

# 차로속도역전현상을 고려한 연속류 도로의 차로별 주행 속도 특성 분석

## Lane-wise Travel Speed Characteristics Analysis in Uninterrupted Flow Considering Lane-wise Speed Reversal

양 인 철\*  
(Yang, Inchul)  
(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

전 우 훈\*\*  
(Jeon, Woo Hoon)  
(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

기 성 환\*\*\*  
(Ki, Sung hwan)  
(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

윤 정 은\*\*\*\*  
(Yoon, Jungeun)  
(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

### 요 약

본 연구에서는 차로별 주행 궤적 데이터를 기반으로 차로속도역전현상이라는 개념을 이용하여 연속류 도로의 차로별 교통류 특성을 분석하였다. 1차로의 주행속도가 다른 차로보다 느린 경우를 차로속도역전현상이라고 정의하고, 이를 수식화하였다. 서울외곽순환고속도로(자유로IC~장수IC, 총 18.7km)를 대상으로 주중 5일(월~금) 동안의 오전 첨두시간대 차로별 주행 궤적 자료를 활용하여 거시적 측면과 미시적 측면에서 차로속도역전현상을 분석하였다. 실험구간 전체를 대상으로 차로별 주행속도를 비교한 거시적인 측면의 결과에서는 차로속도역전현상이 발생하지 않았으나, 실험구간을 세분화한 후 단위구간별 주행속도를 이용하여 미시적인 분석을 수행한 결과는 거시적인 분석 결과와 다르게 차로속도역전현상이 많이 발생하는 것으로 나타났다. 보다 혼잡한 구간에서 차로속도역전현상이 두드러지게 나타났고, 고속도로 기본구간보다는 연결로 접속부 구간에서 차로속도현상의 강도가 높게 나타났다. 본 연구의 결과는 머지않아 도래할 차로 교통정보 시대를 대비하여 현재의 교통정보 서비스 링크 단위의 적정성 판단, 차로 기반의 최적 경로 안내 서비스의 방향 결정 등에 기초적인 데이터로 활용이 가능하다.

핵심어 : 차로별 교통류 특성, 차로속도역전현상, 통행속도, 주행속도

### ABSTRACT

In this study, lane-wise traffic flow characteristics were analysed on uninterrupted flow using a new notion of "lane-wise travel speed reversal (LTSR)" which is defined as a phenomena that travel speed in the median lane is lower than other lanes. Mathematical formulation was also proposed to calculate the strength of LTSR. The experiment road site is Seoul Outer Ring Expressway (Jayuro-IC~Jangsoo-IC), and travel trajectories for each four lane were collected for weekdays (Mon. through Fri.) during morning peak. Comparing lane-wise travel speeds for entire test road section, no LTSR was observed, meaning that the travel speed in the median lane is the fastest, followed by 2nd, 3rd, and 4th lane as in order. However, the result of microscopic analysis using 100-meter discrete road section based data shows that LTSR occurs many times. Especially the strength of LTSR is higher in congestion area and freeway merge and diverge segment. It is expected that these results could be used as a fundamental data when establishing lane-by-lane traffic operation strategy and developing lane-wise traffic information collection and dissemination technology.

Key words : lane-wise traffic flow characteristics, lane-wise travel speed reversal, travel speed

† 본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업(15TLRP- B101406-01)의 세부과제인 "자율협력주행을 위한 도로기반시설 고도화 기술 개발" 과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

\* 주저자 : 한국건설기술연구원 도로연구소 수석연구원, 과학기술연합대학교대학원 교통물류 및 ITS공학과 교수

\*\* 교신저자 : 한국건설기술연구원 도로연구소 수석연구원

\*\*\* 공저자 : 한국건설기술연구원 도로연구소 신진연구원

\*\*\*\* 공저자 : 한국건설기술연구원 도로연구소 신진연구원

† Corresponding author : Jeon, Woo Hoon(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology), E-mail cwmoon@kict.re.kr

† Received 14 October 2016; reviewed 26 October 2016; Accepted 28 November 2016

## I. 서 론

### 1. 연구배경 및 목적

20세기 후반에 등장한 인터넷을 비롯한 각종 정보통신 기술은 전 세계의 산업 발전을 견인해 왔으며, 이러한 발전은 스마트폰과 사물인터넷(IoT, Internet of Things), 인공지능, 빅데이터 기술의 등장으로 더욱 가속화되고 있다. 도로교통 분야도 과거에는 상상만으로 가능했던 여러 가지 기술들이 현실화되었거나 머지않은 미래에 실현이 될 것으로 예상된다. ATIS (Advanced Traveller Information System)라는 용어가 처음 등장했던 시기에는 최신 기술로 각광받던 VMS (Variable Message Sign)를 통한 교통정보 제공은 이제 과거의 기술로 치부되고 있다. 지금은 누구나 소지하고 있는 스마트폰에서 한 번의 터치로 통해 교통정보를 조회할 수 있는 많은 앱들이 제공되고 있다. 초창기 제공되는 교통정보는 적은 수의 데이터에 모형을 접목하여 현재 상황을 추정하는 방식으로 생산되었으나, 스마트폰과 같은 모바일 기기의 등장으로 위치 기반의 이동과 관련된 데이터를 훨씬 쉽게 취득 가능하게 되었고, 이는 데이터 기반의 교통정보 수집 및 제공을 가능하게 한다. 이러한 첨단 정보 수집 및 제공 기술의 발전과 더불어 교통정보의 질 또한 점차 개선되어 가고 있다. 하지만 여전히 도로 링크 기반의 정보 제공이 교통정보 시장의 주를 이루고 있다. 교통정보의 질적 향상을 위해서는 도로를 구성하는 각 차로의 교통류 특성이 상이함을 반영할 수 있는 차로 기반의 교통정보의 수집 방법의 개발이 필요하며 이를 위해서는 먼저 차로별 교통류 특성에 대한 다양한 연구와 깊이 있는 논의가 선행되어야 한다. 이는 현실의 교통 객체 간의 상호작용을 모사하는 미시 시뮬레이션 모형 개발에 적용이 가능한데, 차로별 교통량 또는 속도 분포 비율 계수를 모형에 접목함으로써 차로별로 다르게 나타나는 특성을 보다 정확하게 모사할 수 있다.

이에 따라 본 연구에서는 차로속도역전현상이라는 개념을 이용하여 연속류 도로의 차로별 주행 속도 특성을 분석하였다. 이를 위하여 차로속도역전현

상을 정의하고 수학적 접근법을 제안하였다. 서울외곽순환고속도로의 실주행 궤적 자료를 기반으로 거시적 측면과 미시적 측면에서 차로속도역전현상을 분석하였다.

### 2. 연구범위 및 방법

본 연구에서는 차로속도역전현상을 정의 및 수식화하고, 이를 기반으로 연속류 도로의 차로별 주행 궤적 자료를 활용하여 차로속도역전현상이 발생하는 원인을 분석한다. 차로별 주행 궤적 자료는 서울외곽순환고속도로(자유로IC~장수IC, 총 18.7km)를 4대의 차량이 차로별로 일정한 주행 규칙에 따라 주중 5일(월~금) 동안 오전 첨두시간대에 주행하여 수집한 자료이다.

## II. 선행연구 고찰

차로별 교통류 특성 분석에 관한 연구는 국외의 연구자들을 중심으로 꾸준히 수행되어 왔다([1-4]).

Carter et al.(1999)[1]는 미시 시뮬레이션 정산을 위한 분석을 검토한 결과, 차로별로 시뮬레이션 모형의 교통류 계수가 상이하게 적용되어야 하며, 모든 차로에 동일하게 획일적인 계수를 적용할 수 없다는 사실을 발견하였다. 또한 3차로 도로에 대해 교통류율과 통행속도 간의 관계 분석을 통해 비혼잡 시 중앙차로(median lane, 1차로)의 속도와 교통량이 다른 차로에 비해 높게 나타남을 확인하였고, 중심차로(center lane, 2차로)의 경우 비혼잡구간에서는 중앙차로와 유사한 특성을 갖는 반면, 혼잡구간에서는 길어깨차로(shoulder lane, 3차로)와 유사한 특성을 가짐을 확인하였다.

Daganzo(2002)[2]의 연구는 행태적 관점에서 차로별 교통류를 분석한 초기 연구 중 하나이다. 운전자를 공격적/비공격적인 부류로 구분하고 자유교통류 상태에서 공격적 운전자들이 비공격적 운전자를 추월하기 때문에 공격적인 운전자들은 추월차로를, 비공격적인 운전자들은 외측 차로를 이용한다고 가정하였다. 혼잡 교통류 상태에서는 차로 간 속도차이가 줄어들면서 공격적 운전자들이 추월차로를 벗

어나 다른 차로로 재분배된다고 가정하였고, 실험을 통해 이를 증명하였다.

Amin and Bank(2005)[3]는 미국 캘리포니아 샌디에고의 주요 고속도로를 대상으로 차로별 교통류 분포를 이용하여 차로 선택 특성을 분석하였다. 30초 단위로 수집된 통과 교통량과 점유율 자료를 분석에 이용하였으며, 모든 자료는 Single-loop 검지기로 수집되었고, 속도 자료의 경우 교통량과 점유율 관계를 통해 추정된 자료를 이용하였다. 분석을 위해 차로별 교통량 비율이라는 분석 지표를 제시하였는데, 이는 차로의 교통량을 전체 차량 수로 곱한 후 이를 다시 전체 차로의 교통량으로 나눈 값으로, 이 지표의 값이 1보다 크면 해당 차로의 이용률이 평균 수준을 넘어섬을 의미한다. 분석 결과, 중앙차로의 교통량은 전체 교통량 증가에 비례하여 증가하며 그 크기는 교통량이 많은 경우 다른 차로에 비해 높은 값을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 증가하는 패턴은 차이를 보였는데, 교통량 증가에 따라 꾸준히 증가하거나, 증가 추세를 보이다가 특정 구간 이후에서 감소하는 추세를 보이기도 했다.

Duret et al.(2012)[4]은 3차로 연속류 도로의 차로별 교통류 특성 분석을 통해 차로별 교통량의 분포가 특정한 형태를 갖는다는 사실을 발견하였다. 또한 총 차로의 교통량에 대한 개별 차로의 교통량 비율이 선형이며, 중앙차로의 교통량비율은 선형 증가인 반면, 중심차로와 길어깨차로는 선형 감소하는 경향이 있음을 확인하였다.

국내의 경우 Rim et al.(2011)[5]이 V2X 기반의 교통정보시스템을 활용한 차로별 통행시간 추정 방법론을 개발하였고, Yoon et. al.(2016)[6]은 차로 간 속도비율을 이용하여 2, 3, 4차로 고속도로의 VDS 자료를 분석하였는데, 혼잡 시에 비해 비혼잡 시 차로 간 속도 차가 크게 나타났다.

위와 같이 기존 연구에서는 다양한 접근법으로 차로의 교통류 특성을 분석하였으나, 차로속도역전현상의 개념으로 접근한 연구는 찾기 어렵다. 또한 본 연구에서는 차로 주행 궤적 자료를 활용했다는 점에서도 선행연구와 차별된다.

### Ⅲ. 차로속도역전현상 분석 방법론 정의

#### 1. 차로속도역전현상의 정의

우리나라와 같이 지정차로제를 운영하는 국가의 연속류 도로에서는 자연스럽게 차로별 주행속도에 차이가 발생한다. 도로교통법 시행규칙 제39조에 따르면 고속도로의 경우 1차로는 추월차로, 2차로는 승용차, 중·소형승합차, 3차로는 대형승합차, 적재중량 1.5t이하 화물차, 4차로는 적재중량 1.5t 초과 화물차와 특수차·건설 기계가 주행하도록 규정하고 있다. 이에 따라 주행 가능한 차종의 주행능력에 따라 1차로의 주행속도가 다른 차로보다 빠르게 나타나는 게 일반적이다. 하지만 도로의 기하구조, 교통상황, 연결로 등 다양한 주행 조건에 의해 1차로의 주행속도가 다른 차로보다 느린 경우가 발생하며, 본 연구에서는 이러한 현상을 차로속도역전현상이라고 정의하였다. 이러한 현상은 운전자의 일반적인 주행 행태에 변화를 야기하는데, 빠른 주행을 원하는 운전자의 잦은 차로 변경이 한 예가 될 수 있다. 따라서 차로속도역전현상을 파악하고 그 원인을 규명하는 것은 도로교통 안전을 위해 필수적이며, 나아가 원활한 도로소통을 위한 운영 방안을 제시할 수 있는 근거를 제시할 것으로 판단된다.

#### 2. 차로속도역전현상의 수학적 정의

본 연구에서는 차로속도역전현상을 수학적으로 정의하기 위해 연속된 도로를 이산(discrete)된 형태의 단위구간으로 분할한 후, 단위구간 내 차로별 주행속도를 비교하였다. 먼저,  $\sigma_l^s$ 를 1차로와 다른 차로 간의 주행속도 비율이라 정의하고, 식(1)과 같이 표현한다.

$$\sigma_l^s = \frac{u_l^s}{u_1^s} \dots\dots\dots (1),$$

여기서,  $u_l^s$  : 단위구간  $s$  내 차로  $l$ 의 주행속도;  
 $l > 1$ .

1차로는 일반적으로 가장 높은 주행속도를 보이는 때문에 1차로 주행속도를 기준으로 다른 차로의

주행속도를 비교함으로써 차로속도역전현상을 관측할 수 있다. 예를 들어, 1차로의 주행속도가 50kph 이고, 2차로( $l = 2$ )가 60kph라면  $\sigma_2^s$ 는 1.2가 되고, 이는 1차로보다 2차로의 주행속도가 1.2배 큰 것을 나타낸다.

다음으로,  $\hat{\delta}_l^s$ 를 1차로와 다른 차로 간의 ‘일시적인’ 차로속도역전현상을 나타내는 이진변수(binary variable)로 정의하고, 이를 수학적으로 식(2)과 같이 표현한다.

$$\hat{\delta}_l^s = \begin{cases} 1 & \text{if } \sigma_l^s > 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots\dots (2),$$

여기서,  $l > 1$ .

단위구간  $s$ 의 1차로의 주행속도( $u_1^s$ )보다 차로  $l$ 의 주행속도( $u_l^s$ )가 더 크면  $\hat{\delta}_l^s$ 이 1의 값을, 그렇지 않으면 0의 값을 갖는다. 위의 예에서와 같이  $\sigma_2^s$  값이 1.2이면, 해당 단위구간에서 일시적으로 차로 속도역전현상이 발생한 것이다. 여기서 ‘일시적’이라는 표현을 사용한 것은 하나의 단위구간에서 발생한 차로속도역전현상이 해당 도로의 일반적인 현상을 대표하지 않기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 일시적인 차로속도역전현상이 연속적으로  $K$ 번 이상 발생할 경우 해당 도로에서 차로속도역전현상이 발생한 것으로 정의하였다. 즉,  $\hat{\delta}_l^s = 1$ 인 단위구간이  $K$ 개 이상 연속될 경우 차로속도역전현상이 발생한 것으로 판단한다. 따라서, 최종적으로 실제 차로속도역전현상을 나타내는 이진변수는  $\delta_l^s$ 으로 정의하며, 차로속도역전현상이 발생한 단위구간의  $\delta_l^s$ 은 1의 값을 갖고, 그렇지 않은 단위구간에서는 0의 값을 갖는다.  $\hat{\delta}_l^s$  값을 이용하여  $\delta_l^s$  값을 계산하는 알고리즘은 다음과 같다.

**Step 1. (초기화)**

- ① 모든 단위구간에 대해 임시변수  $\alpha^s$ 를 정의하고, 0으로 초기화한다.

**Step 2. (연속된  $K$ 개의  $\hat{\delta}_l^s = 1$ 인 단위구간 찾기)**

- ① 1번째부터  $S - K + 1$ 번째까지의 단위구간에 대해 다음의 절차를 수행한다.
  - i) 임시변수  $n$ 에 0을 대입한다.
  - ii) 현재 단위구간을 포함한 연속된  $K$ 개의 단위구간의  $\hat{\delta}_l^s$  값을 확인하여  $\hat{\delta}_l^s = 1$ 일 경우  $n$ 을 1씩 증가시킨다.
  - iii) 만약  $n = K$ 라면, 연속된  $K$ 개 단위구간의  $\alpha^s$ 에 1을 대입한다.

**Step 3. ( $\delta_l^s$  값 계산하기)**

- ① 모든 단위구간에 대해 다음 수식을 이용하여  $\delta_l^s$  값을 계산한다.
 
$$\delta_l^s = \hat{\delta}_l^s \times \alpha^s$$

**Step 4. (종료)**

위의 알고리즘에서 사용된  $\alpha^s$ 는 해당 단위구간이 연속된  $K$ 개 단위구간에 포함되는지 여부를 판단하기 위한 임시변수로서, Step 3에서  $\hat{\delta}_l^s$ 의 최종값을 계산하기 위해 도입되었다.

마지막으로 특정 도로구간에서 발생하는 차로속도역전현상의 세기 정도(strength level)를 계산하기 위해 차로속도역전현상 강도,  $\tau_a$ 를 정의한다. 즉,  $\tau_a$ 는 다수개의 단위구간으로 정의되는 도로구간  $a$  내에서 발생하는 차로속도역전현상의 강도를 나타내는 값으로 식(3)과 같이 표현된다.

$$\tau_a = \left( \sum_{l=2}^L \tau_{a,l} \right) / d_a = \sum_{l=2}^L \left( \sum_{s=1}^S \sigma_l^s \hat{\delta}_l^s \right) / d_a \dots (3),$$

- 여기서,  $S$ : 도로구간  $a$  내 단위구간의 총 개수;
- $L$ : 도로구간의 총 차로 수;
- $\tau_{a,l}$ : 1차로에 대한 차로  $l$ 의 차로속도역전현상 강도 ( $l > 1$ );
- $d_a$ : 도로구간  $a$ 의 길이.

본 연구에서 새롭게 제안된  $\tau_a$ 는 단위구간의 길이와  $K$ 값에 의존적이기 때문에 동일한 조건의 분석 환경 내에서 도로구간 간의 차로속도역전현상 크기를 비교하기에 적합하며, 다른 조건의 분석 환경에서 계산된  $\tau_a$ 는 다를 수 있음을 유의해야 한다.

#### IV. 차로별 주행 속도 특성 분석

##### 1. 자료 수집

본 연구에서는 서울외곽순환고속도로를 대상으로 네 대의 차량이 동시에 각 차로를 주행하여 차로별 주행 데이터를 수집하였다. 주행 실험은 2014년 7월 14일(월)부터 7월 18일(금)까지 일주일간이며, 오전 침투 시간대를 시간적 범위로 설정하였다. 공간적 범위로는 <Fig. 1>과 같이 서울외곽순환고속도로 구리방면으로 자유로IC부터 장수IC까지 18.7km 구간을 설정하였는데, 총 7개의 IC 및 JC와 1개의 톨게이트(김포TG)로 구성된다. 계양IC부터 송내IC까지는 상습 정체구간으로 유명하고, 김포톨게이트 부근도 출퇴근 및 주말 혼잡이 심하다. 기하학적으로는 대상구간의 대부분이 4차로로 구성되어 있고, 고속도로 기본구간과 연결로 접속부로 구성되며, 곡선부와 직선부가 혼재되어 있다.

차로별 주행 관측 대상 항목은 차량 궤적(초단위 GPS좌표와 시각으로 구성)과 주행 영상이다. 차량 궤적은 주행시간 또는 속도로 변환이 가능하며, 주행 영상은 특별한 이벤트를 확인하는데 활용된다. 본 실험은 개별 차량이 동시에 주어진 차로를 주행하며 자료를 수집하기 때문에 주행 조건과 행태를 동일하게 유지할 필요가 있다. 주행 시 차로변경은 원칙적으로 금지하나 앞차의 속도가 혼잡이 아님에

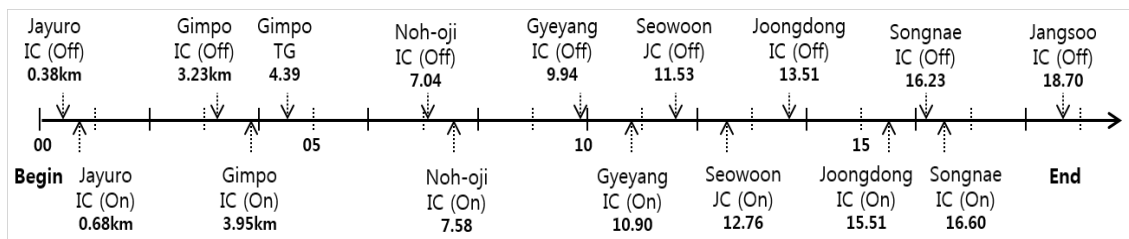
도 불구하고 최저속도(40kph) 이하이거나 옆 차로에 비해 주행속도가 현저히 차이는 경우에는 차로변경을 통해 추월할 수 있도록 했으나, 실제 실험에서는 이러한 일이 발생하지 않았다. 또한 주행 중에는 모든 교통법규와 제한속도를 준수하도록 하였다. 주행 실험을 통해 매일 4개 차로에 대해 궤적과 주행 영상을 관측하여, 5일 동안 총 20개의 데이터를 수집하였다.

##### 2. 기초 분석

요일별로 차로의 평균 주행속도를 비교·분석하기 위해 궤적 데이터를 활용하여 차로별 평균 주행속도를 계산하였고, 그 결과는 <Table 1>과 같다. 요일별 혼잡수준은 금요일(평균속도 29.1kph)의 혼잡이 가장 심하고, 목요일(평균속도 42.9kph)이 가장 원활한 것으로 나타났다. 차로별 주행속도를 비교하면, 월, 수, 목요일에는 1차로가, 화, 금요일에는 2차로가 가장 빠른 것으로 나타났다. 이는 지정차로제를 운영하는 우리나라의 도로교통 상황을 고려했을 때 쉽게 유추할 수 있는 결과로서, 추월차로의 기능을 하는 1차로가 가장 빠르고, 다음으로 2차로, 3차로, 4차로 순으로 나타난 것이다.

<Table 1> Avg. travel speed by lane and day of week (kph)

Day of Week	Lane Number			
	1	2	3	4
Mon	36.6	35.1	35.6	36.4
Tue	36.8	41.3	40.1	37.8
Wed	40.4	38.5	37.4	37.2
Thu	45.5	44.3	41.2	40.7
Fri	29.1	29.6	28.6	29.3



<Fig. 1> Test road overview (IC/JC/TG names and their kilo-post from the start point)

위와 같은 결과는 요일별로 차로 주행속도에 순위를 매겨 그 합을 비교할 경우 더욱 분명하게 나타난다. <Table 2>를 보면, 1차로의 경우 월, 수, 목요일에는 가장 높은 주행속도를 갖지만, 화요일은 4번째, 금요일에는 3번째인 것으로 나타났다. 순위에 대한 단순 합을 통해 상대적인 비교를 했을 경우, 1차로와 2차로가 10점으로 가장 낮은 값을 갖고, 4차로는 16점으로 가장 높은 값을 갖는다. 3차로는 14점으로 세 번째인 것으로 나타났다. 이러한 결과는 지정차로제를 운영하는 현실에서 당연한 결과로 받아들일 수 있다. 특히, 실험 대상구간과 같이 4차로로 구성된 연속류도로에서, 1차로는 앞자리 차로이고, 2차로는 승용차 차로이기 때문에, 화물차(1.5톤 이하는 3차로, 이상은 4차로)가 주로 이용하는 3, 4차로는 주행속도가 낮다. 또한 4차로에서는 IC/JC에서 진입과 진출이 빈번하게 발생하기 때문에 주행속도가 가장 낮을 수밖에 없다.

<Table 2> Avg. travel speed rankings by day of week

Day of Week	Lane Number			
	1	2	3	4
Mon	1	4	2	3
Tue	4	1	2	3
Wed	1	2	3	4
Thu	1	2	3	4
Fri	3	1	4	2
Sum	10	10	14	16

위와 같이 실험 구간 전체를 대상으로 차로별 주행속도를 비교할 경우 차로의 주행속도 역전 현상은 크게 발생하지 않는 것으로 보인다. 하지만 주행속도 데이터 분석을 미시적으로 접근할 경우에도 동일한 현상이 발생하는지는 알려져 있지 않다. 따라서 다음 절에서는 차로별 주행속도 데이터를 구간별로 세분화하여 분석하였다.

### 3. 차로속도역전현상 분석

#### 1) 분석 자료 준비

이번 절에는 차로별 주행속도를 구간별로 세분

화하여 차로속도역전현상을 분석하였다. 이를 위해 전체 실험 구간을 100m 길이의 단위구간으로 분할하고, Jeon and Yang(2016)[7]이 제안한 알고리즘을 이용하여 주행 궤적 데이터를 단위구간별 주행속도 데이터로 변환하였다. 실험 구간의 전체 길이가 18.7km이므로, 전체 단위구간은 187개이고, 단위구간의 속도는 단위 길이 100m를 GPS 시간으로 나누어 계산하였다.

본 연구에서는 차로속도역전현상이 발생한 도로구간을 정의하기 위해  $\delta_i^s = 1$ 인 단위구간이 3(=k)개 이상 연속해서 발생한 도로구간, 즉 300m 이상의 구간에서 연속해서 차로속도역전현상이 발생하는 도로구간을 차로속도역전현상 도로구간으로 정의하였다.

#### 2) 분석 구간 분할

차로속도역전현상을 분석하기 위해 실험대상 전체구간 18.7km의 연속류 도로를 16개의 분석구간으로 세분화하였다. IC, JC, TG를 기준으로 세분화하였고, 세분화된 분석구간은 <Table 3>과 같다.

<Table 3> Analysis road sections information (km)

Sec	Start	End	Length	Cat.*
1	Begin	Jayuro IC (Off)	0.38	2
2	Jayuro IC (Off)	Jayuro IC (On)	0.30	2
3	Jayuro IC (On)	Gimpo IC (Off)	2.55	1
4	Gimpo IC (Off)	Gimpo IC (On)	0.72	2
5	Gimpo IC (On)	Gimpo TG	0.44	2
6	Gimpo TG	Noh-oji IC (Off)	2.65	1
7	Noh-oji IC (Off)	Noh-oji IC (On)	0.54	2
8	Noh-oji IC (On)	Gyeyang IC (Off)	2.36	1
9	Gyeyang IC (Off)	Gyeyang IC (On)	0.96	2
10	Gyeyang IC (On)	Sewoon JC (Off)	0.63	2
11	Sewoon JC (Off)	Sewoon JC (On)	1.23	1
12	Sewoon JC (On)	Joongdong IC (Off)	0.75	2
13	Joongdong IC (Off)	Joongdong IC (On)	2.00	1
14	Joongdong IC (On)	Songnae IC (Off)	0.72	2
15	Songnae IC (Off)	Songnae IC (On)	0.37	2
16	Songnae IC (On)	Jangsoo IC (Off)	2.10	1

\* Segment category: (1) basic freeway segment, (2) freeway merge and diverge segment

분석구간별로 기본구간(basic freeway segment)과 연결로 접속부 구간(freeway merge and diverge segment)으로 구분하였다. 구분 기준은 구간 길이를 활용하였고, 구간 길이가 1km이상인 구간은 고속도로 기본구간으로, 그렇지 않은 구간은 연결로 접속부로 구분하였으며, 결과적으로 6개 구간이 기본구간으로, 10개 구간이 연결로 접속부 구간으로 분류되었다. 참고로 김포TG는 연결로 접속부 구간에 포함하였다.

도로구간 별 주행속도는 <Table 4>와 같으며, 음영으로 표시된 부분과 같이 계양IC부터 송내IC까지의 구간이 혼잡한 것으로 나타났고, 김포TG부터 노오지IC까지에서 주행속도가 감소하는 것으로 나타났다.

<Table 4> Sectional avg. travel speed by day of week (kph)

No	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri
1	90.9	90.6	97.8	89.2	93.0
2	82.1	82.9	92.9	82.3	90.6
3	81.2	82.6	90.0	84.4	83.6
4	81.0	81.1	84.7	78.6	87.3
5	71.4	72.4	81.3	73.4	73.6
6	51.9	53.8	61.7	61.4	47.5
7	87.5	88.7	90.7	82.3	88.9
8	84.0	91.7	93.6	83.8	89.4
9	46.6	87.0	95.5	74.7	63.3
10	17.1	83.7	89.8	73.2	10.4
11	14.4	18.8	15.0	24.5	9.7
12	13.6	16.3	13.1	22.6	14.2
13	21.0	16.2	17.1	17.4	12.3
14	21.9	20.5	21.8	23.0	16.9
15	35.4	28.1	23.7	31.7	27.9
16	50.6	48.1	47.7	48.1	45.8

\* Shaded cell means congested traffic flow.

### 3) 요일별 차로속도역전현상 분석

실험구간 전체에 대해 요일별로 차로속도역전현상 강도,  $\tau$ 를 계산하였고, 그 결과는 <Table 5>와 같다. 첫 번째 열은 1차로에 대한 2차로의 속도역전

현상 강도( $\tau_{T,2}$ )를, 두 번째, 세 번째 열은 각각 3차로, 4차로의 강도( $\tau_{T,3}$ ,  $\tau_{T,4}$ )를, 마지막 열은 1차로에 대한 다른 모든 차로의 강도 합( $\tau_T$ )을 나타낸다.  $\tau_T$ 의 경우 금요일이 가장 크고, 월요일, 목요일, 수요일, 화요일 순으로 나타나는데, 이는 <Table 1>의 평균혼잡수준과 유사한 패턴을 보인다. 즉, 평균혼잡이 가장 심한 금요일에 차로속도역전현상( $\tau_T$ )도 심하게 나타나고, 두 번째로 혼잡이 심한 월요일에 두 번째로 심하게 나타났다. 상대적으로 소통이 원활한 화요일과 수요일에는 차로속도역전현상이 낮게 나타났다. 이러한 결과는 도로의 혼잡이 심할수록 차로속도역전현상도 많이 발생함을 의미한다. 차로별 강도를 비교했을 때도 전체 강도와 유사한 결과를 보이지만, 흥미로운 것은 2차로보다 3차로의 강도가 높게 나타나는 것이다. 이는 혼잡 시 3차로의 속도가 가장 높게 나타나는 것을 의미한다.

<Table 5> Lane-wise Travel Speed Reversal Strength by day of week

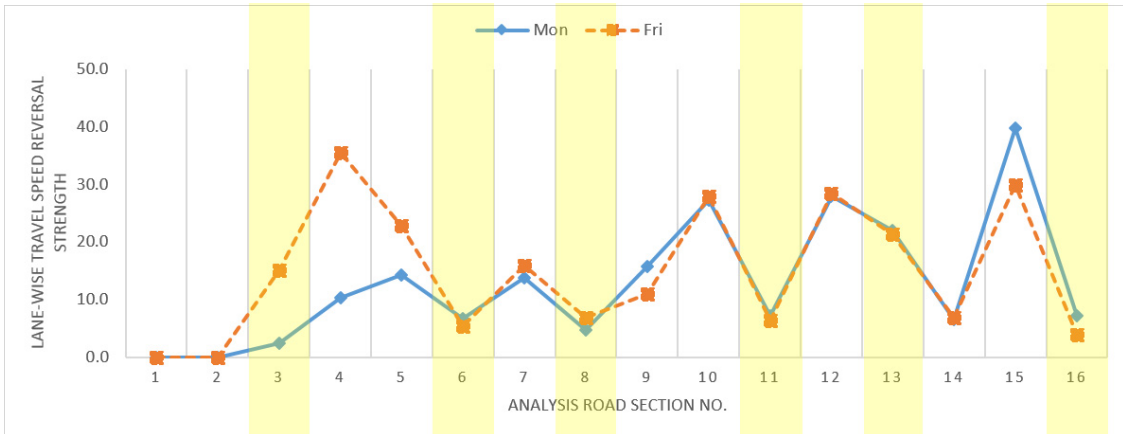
	Mon.	Tue.	Wed.	Thu.	Fri.
$\tau_{T,2}$	3.6	2.7	3.4	3.2	3.4
$\tau_{T,3}$	3.9	2.7	2.9	3.2	5.8
$\tau_{T,4}$	3.0	1.6	1.6	3.3	3.5
$\tau_T$	10.6	7.0	7.9	9.8	12.7

### 4) 구간별 차로속도역전현상 분석

16개 도로구간에 대해 차로속도역전현상 강도,  $\tau$ 를 계산하였고, 그 결과는 <Table 6>과 같다. 전체 자료 중  $\tau$ 값이 큰 월요일과 금요일 자료를 그림으로 표현하면 <Fig. 2>와 같은데, 음영으로 처리된 기본구간으로 분류되는 도로구간(3, 6, 8, 11, 13, 16)이 연결로 접속부 구간에 비해 차로속도역전현상이 약하게 나타난 것을 볼 수 있다. 이는 차로속도역전현상이 기본구간보다는 연결로 접속부 구간에서 강하게 발생함을 의미한다. 또한 소통이 원활한 1번~9번 구간보다 혼잡이 발생한 10번~15번 구간의  $\tau_a$ 값이 높게 나타났다. 이는 이전 절에서

<Table 6> Lane-wise Travel Speed Turn-around Strength ( $\tau_a$ ) by analysis road section

No	start	end	Cat.	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri
1	Begin	Jayuro IC (Off)	2	0.0	0.0	5.4	0.0	0.0
2	Jayuro IC (Off)	Jayuro IC (On)	2	0.0	0.0	3.4	0.0	0.0
3	Jayuro IC (On)	Gimpo IC (Off)	1	2.5	0.0	1.6	4.6	15.1
4	Gimpo IC (Off)	Gimpo IC (On)	2	10.3	12.0	10.0	32.9	35.5
5	Gimpo IC (On)	Gimpo TG	2	14.3	10.1	21.2	12.3	22.8
6	Gimpo TG	Noh-oji IC (Off)	1	6.8	12.2	4.0	16.7	5.3
7	Noh-oji IC (Off)	Noh-oji IC (On)	2	13.8	11.8	5.7	5.7	15.9
8	Noh-oji IC (On)	Gyeyang IC (Off)	1	4.7	0.0	0.0	4.5	6.8
9	Gyeyang IC (Off)	Gyeyang IC (On)	2	15.8	0.0	3.2	0.0	11.0
10	Gyeyang IC (On)	Sewoon JC (Off)	2	27.3	0.0	0.0	5.1	28.0
11	Sewoon JC (Off)	Sewoon JC (On)	1	7.3	14.6	13.3	14.9	6.3
12	Sewoon JC (On)	Joongdong IC (Off)	2	28.0	23.9	22.2	11.5	28.5
13	Joongdong IC (Off)	Joongdong IC (On)	1	22.1	12.4	23.4	19.7	21.4
14	Joongdong IC (On)	Songnae IC (Off)	2	6.5	5.9	0.0	0.0	6.8
15	Songnae IC (Off)	Songnae IC (On)	2	39.8	39.3	6.8	8.4	29.9
16	Songnae IC (On)	Jangsoo IC (Off)	1	7.3	0.0	12.0	5.3	3.9



<Fig. 2> Lane-wise Travel Speed Reversal Strength by analysis road section on Monday and Friday

확인한 혼잡 수준에 따른 차로속도역전현상 강도 변화를 재확인할 수 있는 결과로서, 차로속도역전 현상은 혼잡수준이 높은 상황에서 강하게 발생함을 의미한다. 즉, 차로속도역전현상은 연결로 접속부 구간과 혼잡 상황에서 강하게 나타나며, 이는 기존 합류부 교통류 특성 분석 연구[8, 9] 결과와 같이 본선 차량들이 앞으로 경험하게 될 혼잡에 미리 대비하여 가감속과 차로변경을 수행하기 때문인 것

로 판단된다.

다만, 혼잡이 심한 13번 구간은 고속도로 기본구 간임에도 불구하고  $\tau_a$  값이 비교적 높게 나타났는데, 이는 도로의 기하구조보다는 혼잡수준이 차로 속도역전현상에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있으나, 구체적인 원인 분석을 위해서는 보다 많은 양의 자료가 필요할 것으로 판단된다.



#### IV. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 차로별 교통류 특성 분석을 위해 차로속도역전현상을 정의 및 수식화하고, 차로별 주행 궤적 자료를 이용하여 분석하였다. 실험구간 전체에 대한 차로별 주행속도를 비교한 결과, 추월 차로의 기능을 하는 1차로가 가장 빠르고, 다음으로 2차로, 3차로, 4차로 순으로 주행속도가 높은 것으로 나타났다. 즉, 거시적인 측면에서 차로속도역전현상은 발생하지 않았다. 그러나 실험구간을 100m 단위구간으로 세분화한 후 단위구간별 주행속도를 이용하여 미시적인 분석을 수행한 결과는 거시적인 분석 결과와 다르게 차로속도역전현상이 많이 발생하는 것으로 나타났다. 소통 원할 구간과 혼잡 구간을 비교했을 때 혼잡 구간에서 차로속도역전현상이 두드러지는 특징을 보였고, 고속도로 기본구간보다는 연결로 접속부 구간에서 차로속도 현상의 강도가 높은 것으로 나타났다.

본 연구는 기존에 주로 활용되던 지점 데이터가 아닌 차로별 주행 궤적 데이터를 분석에 활용했다는 점에서 기존 연구와의 차별성을 갖는다. 이는 동일한 데이터를 기반으로 데이터 가공만을 통해 거시적으로 전체구간의 차로속도역전현상 뿐만 아니라 미시적인 단위구간에 대해서도 분석할 수 있는 장점이 있다. 또한 기존에 막연하게 인식되던 차로속도역전현상을 실제 데이터를 기반으로 검증했는데 점도 본 연구의 차별성이라고 할 수 있다.

도로운영자는 도로구간의 차로별 평균 주행 속도를 기준으로 운영 전략을 수립한다. 연구 결과와 같이 거시적인 측면에서 차로속도역전현상은 발생하지 않기 때문에 운영 전략의 수정은 불필요할 것으로 판단되었으나, 시거 내 교통상황에 따라 차로를 선택하는 운전자가 느끼는 교통 현실은 다르다. 이러한 측면에서 본 연구의 결과는 도로운영자보다 미시적인 접근으로 차로 주행 속도를 관리하고 적절한 운영 전략을 통해 차로속도역전현상이 최소화될 수 있도록 노력할 필요가 있음을 시사한다. 또한 본 연구의 결과는 머지않아 도래할 차로

교통정보 시대를 대비하여 현재의 교통정보 서비스 링크 단위의 적정성 판단, 차로 기반의 최적 경로 안내 서비스의 방향 결정 등에 기초적인 데이터로 활용이 가능하다.

본 연구는 차로별 주행 속도에 대해 기초적인 분석만을 수행했다는 한계를 갖는다. 차로속도역전현상이 혼잡 시 잦은 차로변경으로 인해 발생하는지, 아니면 차로속도역전현상 때문에 잦은 차로변경이 발생하여 혼잡해지는지에 대한 판단은 본 결과만으로는 어렵다. 또한 요일별 차로속도역전현상 분석에서 보듯이 목요일의 경우 평균속도가 가장 높게 나타났음에도 불구하고 차로속도역전현상 강도가 다소 높게 나타났으나, 현재의 자료는 그 원인을 판단하기에 부족하다. 따라서 이러한 현상들에 대한 원인 분석을 위해 추가적인 자료 수집과 연구가 반드시 필요하다. 마지막으로, 앞서 언급한 바와 같이 차로속도역전현상의 강도( $\tau_a$ )는 단위구간 길이와  $K$ 값에 의존적이기 때문에 향후 이 두 값에 대한 민감도 분석 연구가 추가적으로 요구되며, 차로역전현상과 교통량, 점유율 간의 관계 분석도 필요할 것으로 판단된다.

#### REFERENCES

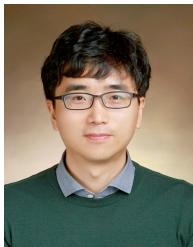
- [1] Carter M., Rakha H. and Aerde M. V.(1999), "Variability of traffic flow measure across freeway lanes," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 26, no. 3, pp.270-281.
- [2] Daganzo C. F.(2002), "A behavioral theory of multi-lane traffic flow, Part I: Long homogeneous freeway sections," *Transportation Research 36B*, pp.131-158.
- [3] Amin M. R. and Banks J. H.(2005), "Variation in freeway lane use patterns with volume, time of day, and location," *Transportation Research Record 1934*, pp.132-139.
- [4] Duret A., Ahn S. and Buisson C.(2012), "Lane flow distribution on a three-lane freeway: General features and the effects of traffic controls," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 24, no. 0, pp.157-167.

- [5] Rim H., Oh C., Kang K. and Kim S.(2011), "Estimation of Lane-Level Travel Times in Vehicle-to-Vehicle and Vehicle-to-Infrastructure-Based Traffic Information System," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2243, no. -1, pp. 9-16.
- [6] Yoon J., Kim H., Lee E-E., Yang I. and Jeon W. (2016), "Analysis of Lane-by-lane Traffic Flow Characteristics in Korea by Using Multilane Freeway Data," *Int. J. Highw. Eng*, vol. 18, no. 3, pp.87-94.
- [7] Jeon W. H and Yang I.(2016), "Unit distance based trajectory calculation algorithm using GPS data," *Conference of the Korean Society of Road Engineers*.
- [8] Kim S., Kim Y., Kim T. and Son Y.(2004), "A Study on Characteristics of Traffic Flow in Congested Traffic at On-Ramp Influence Area," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 22, no. 5, pp.99-109.
- [9] Lee S., Park J and Kang J.(2005), "Analysis of Merging Behaviors and Traffic Characteristics on Freeway Merging Areas According to Acceleration Lane Length," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 23, no. 8, pp.53-66.

저자소개



양 인 철(Yang, Inchul)  
2011년 : Ph.D. in Civil Engineering at Univ. of California, Irvine  
2000년 : 연세대학교 도시공학(교통전공) 석사  
1998년 : 연세대학교 도시공학 학사  
현 재 : 한국건설기술연구원 도로연구소 수석연구원  
e-mail : ywinter75@kict.re.kr



전 우 훈(Jeon, Woo Hoon)  
2016년 : 서울대학교 도시계획학 박사  
2001년 : 한양대학교 교통공학 석사  
1999년 : 한양대학교 교통공학 학사  
현 재 : 한국건설기술연구원 도로연구소 수석연구원  
e-mail : cwmoon@kict.re.kr



기 성 환(Ki, Sung hwan)  
2012년 : 연세대학교 도시공학(교통전공) 석사  
2009년 : 명지대학교 교통공학 학사  
현 재 : 한국건설기술연구원 도로연구소 신진연구원  
e-mail : ksjsjhj@kict.re.kr



윤 정 은(Yoon, Jung Eun)  
2013년 : 아주대학교 교통공학 석사  
2011년 : 아주대학교 교통공학 학사  
현 재 : 한국건설기술연구원 도로연구소 신진연구원  
e-mail : yoon22@kict.re.kr