한국ITS학회논문지 http://dx.doi.org/10.12815/kits.2013.12.4.022
제12권, 제4호 (2013년 8월)
pp.22~32

요금소 하이패스 차로 배치 최적화를 위한 하이패스 차량 교통분산율 추정

Estimation of Hi-pass Traffic Dispersion Rates to Determine The Optimal Location of Hi-pass Lanes at A Toll Plaza

이 재 수* (Jaesoo Lee) 이 기 영** (Ki-Young Lee) 이 철 기*** (Cheol-Ki Lee) 윤 일 수*** (Ilsoo Yun) 유 정 훈**** (Jeong Whon Yu)

요 약

고속도로 이용차량중 통행료 전자지불장치인 하이패스를 장착한 차량의 비율이 급속도로 증가하고 있는 상황에서, 요금소 하이패스 차로 배치의 최적화는 교통제어와 운영측면에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 영업소별 물리적 기하구조 형태와 교통 특성을 고려하여 현재의 하이패스차로 설치 위치의 적정성을 분석하였다. 이를 위해 하이패스 차로별로 차량이 균등하게 배분되어 이용하는가를 측정하기 위해 "하이패스차량 교통분산율"이라는 새로운 평가지표를 개발하였다. 또한 교통분산율에 영향을 주는 변수들을 도출하여 이러한 변수들과 교통분산율과의 관계를 로지스틱회귀모형을 이용하여 추정하였다. 모형추정결과에 따르면 하이패스 교통량, 광장부 길이, 진입연결로와의 거리, 진출연결로와의 거리, 중앙 배치비율, 우측배치비율 등의 변수들이 교통분산율에 영향을 주는 것으로 파악되었으며, 이중에서 하이패스 차로배치 위치 변수인 중앙 배치비율, 우측 배치비율을 조정함으로서 교통분산율을 개선할 수 있는 것으로 밝혀졌다. 본 연구를 통해 하이패스차로 배치의 적정성을 판단할 수 있는 교통분산율을 계량화할 수 있게 되어 하이패스차로 위치 선정과 운영방식을 최적화할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 : 하이패스, 차로배치, 교통분산율, 로지스틱 회귀모형, 요금소

Abstract

Since the percentage of vehicles equipped with Hi-pass, an electronic toll collecting device, has increased rapidly, it is very crucial to determine the optimal location of Hi-pass lanes at a toll plaza in terms of traffic control and operation. In this study, the appropriateness of existing Hi-pass lanes of a toll plaza is evaluated considering its physical geometry and traffic characteristics. A new evaluating criterion called "traffic dispersion rate" is developed in order to measure the level of traffic spreading across the toll booth lanes at a toll plaza. Logistic regression models are constructed to estimate the relationship between the traffic dispersion rate and its affecting variables. The model estimation results show that several variables including Hi-pass lane traffic volume, length of toll plaza, entering/exiting taper lengths, and locations of Hi-pass lanes. The results also suggest that traffic dispersion rate can be increased by adjusting the location of Hi-pass lanes. The study enables us to quantify traffic dispersion rate which can be used to optimize the location and operation of Hi-pass lanes at toll plazas.

Key words : Hi-pass, Lane allocation, Traffic dispersion rate, Logistic regression model, Toll plaza

* 주저자 : 한국도로공사
** 공저자 : 한국도로공사 도로교통연구수원 수석연구원
*** 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 부교수
**** 교신저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 부교수
† 이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2010-0029447 및 NRF-2010-0029451)
† 논문접수일 : 2013년 07월 23일
† 논문심사일 : 2013년 07월 30일
† 게재확정일 : 2013년 08월 12일

Ⅰ. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

고속도로에서 일평균 하이패스 교통량은 2007년 12월 전국 하이패스 개통 당시의 약 50만대에서 2013년 2월 기준 약 192만대로 증가하였으며, 하이패스 이용률은 고속도로 이용차량의 57.3% 수준에 이르고 있다[1]. 하이패스 일평균 이용량이 2008년 대비 4배가량 증가하였고, 고속도로 이용차량의 57% 이상이 하이패스를 이용하고 있는 시점에서 원활한 교통흐름에 문제가 없도록 전반적인 하이패스 운영에 관한 재검토가 필요하다. 이중에서 하이패스 차로의 적정 배치 문제는 가장 중요한 이슈이며, 이는 하이패스차로가 해당 영업소 특성에 맞게 적절히 배치되지 못하면 하이패스 차량들의 무리한 차로변경이나, 특정 하이패스 차로에 쏠리는 현상이 발생하여 상당한 혼잡 및 안전사고가 발생할 수 있기 때문이다.

기존 차로배치 원칙을 살펴보면, 도로진행 방향으로 왼쪽 1차로 배치를 원칙으로 하되, 진출입로가 영업소와 가까운 곳에서는 중앙에 설치하도록 유도하고 있다. 그러나 지역 여건 및 도로 기하구조 형태에 따라 각 영업소별 교통 특성이 다르기 때문에 예외적인 상황이 자주 발생하며, 특히 현재의 배치 방법이 적정한가에 대한 재검토를 해야 할 시점이다. 따라서 본 연구에서는 교통량이 많고 주행 속도가 높은 본선형 영업소를 대상으로 하여 각 영업소마다 배치된 하이패스 차로에 하이패스 차량이 균등하게 배분되어 이용하는가를 측정함으로써 적정 배치 상태 여부를 판정해 보고자 한다. 먼저 각 영업소마다 배치된 하이패스 차로에 균등한 교통량이 이용되었는가를 평가할 수 있는 하이패스 차량 "교통분산율(TDR: Traffic Dispersion Rate)"이란 평가지표를 개발하였다. TDR은 하이패스 차로별 실제 이용교통량을 각각 곱한 값에, 총 하이패스 교통량이 하이패스 차로에 균등하게 배분한 교통량을 각각 곱한 값으로 나눈 것으로, 1에 가까울수록 고른 하이패스 차로 이용분포를 보이는 것이고, 0에 가까울수록 편중된 이용 상황을 나타내는 지표이다. 또한 TDR에 영향을 주는 주요 설명변수인, 영업소 형태 및 기하구조, 진출입 연결로 특성, 교통특성, 차로배치 현황 등과의 회귀분석을 통해 TDR율 추정하는 회귀모형을 개발하였다. 특히 TDR은 0과 1사이의 실수만을 가지게 되므로, 1을 상한치로 하는 로지스틱 곡선 형태의 회귀식을 사용하는 것이 가장 적절할 것으로 판단되어 이를 적용하였다. 본 연구결과는 하이패스 차로별 균등한 교통량 배분을 유도하기 위해 어떠한 요인을 조정해야 하는지, 특히 배치 위치를 어떻게 결정해야 하는지를 평가할 수 있는 분석 도구로 활용 가능할 것이다.

2. 선행 연구 고찰

Bae(2011)은 고속도로 ETC 차량이 하이패스 차로를 이용하기 위해 시행되는 변경차로횟수를 최소화하기 위한 차로배치 방법론을 제안하였다. 그러나 경험적 방법에 의해 각 case 마다 차로변경횟수를 측정하여 구하는 방식으로, 이를 수리적으로 체계화하지는 못하였다[2]. Emmanuel et al.(2005)은 대기행렬 분석을 이용하여 전자식요금징수시스템(Electronic Toll Collection System: ETCS) 차로와 일반 수동식 요금징수(Manual Toll Collection) 차로에서 각각 처리하는 교통량의 비율이 요금소 진입 광장부에서의 교통정체 수준에 미치는 영향을 제시하였다. 필리핀의 경우 "E-PASS" 브랜드로 ETCS가 운영되고 있는데, ETCS 차로의 증가가 영업소의 전체 처리교통량을 증가시키고, 이러한 현상이 E-PASS 보급률을 증가시키는 것으로 분석하였다[3]. Wong et al.(2006)은 ETCS 차로 안내표시와 gantry 안내간판 설치 등이 toll plaza에서 교통흐름과 안전에 영향을 주는지에 대한 여부를 분석하였다. 설치 전·후를 비교한 결과 설치 후 차로 변경율은 23% 감소, 상충횟수는 44% 감소, 충돌횟수는 38%정도 감소하는 것으로 나타났다[4]. Polus and Reshetnik(1997)은 영업소 광장부 차로의 적절한 구성이 서비스 수준뿐만 아니라 운영비용과 처리용량에 중요한 영향을 주기 때문에 균형적인 설계가 필

요하다고 제시하였다. 자동차 요금 지불 차로 수, 일반 수동식 요금징수 차로 수 등을 사전계획단계에서 결정하고 시뮬레이션을 이용하여 미세 조정하는 절차를 통해 최종적인 차로 수 구성을 결정하였다. 광장부 계획은 통과차로와 관련한 광장부 편심률과 각 gate 대기길이와 같은 교통류와 기하구조의 조합을 고려하여 적절한 계획이 되도록 트럭의 비율, 차로별 서비스시간 분포, 처리교통용량을 주요 변수로 제시하였다[5]. 여기서 광장부 편심률(e)은 요금징수차로들의 배치형태를 기하학적으로 나타내는 수치로서 주변부로 갈수록 편평해지는(비구면) 정도를 나타내게 된다. Cho et al.(2002)은 SIMPLUS를 이용한 고속도로 요금소 시뮬레이터를 개발하여 ETCS와 같은 새로운 요금징수시스템을 도입할 경우의 효과평가를 수행하였다. 특히 미시적 시뮬레이션을 통해 고속도로 요금소의 확장, 시간대별 교통량 변화에 따른 요금소 운영 방안과 같은 다양한 형태의 요금소 운영시스템을 분석하였다[6].

FHWA(2008) 보고서에서는 고속도로 연결로 존재 유무에 따른 ETCS 차로의 배치 방안에 대한 연구를 수행하였다. 고속도로 영업소 이용차량에 대한 안전개선 전략을 제시하였으며, 안전개선 전략 중 ETCS 차로 배치에 적용할 수 있는 차로변경과 합류과정에서의 위험요소 감소에 대한 전략을 중점적으로 수행하였다. ETCS 차로 배치 방안으로 고속주행차로인 영업소 좌측차로에 ETCS 차로를 설치해야 하며, 진출, 진입 연결로가 고속도로 영업소 근처에 존재한다면 ETCS 차로를 영업소 좌측과 우측차로에 설치해야 한다고 제시하였다. 또한, 도로노면표시, 표지판, 방호시설 등 안전시설 설치 요령에 대해 다양하게 제시하였고, 도로 안내 및 정보제공은 영업소 전 본선에서부터 이루어져야 한다고 강조하였다. 특히 ETCS 차로와 일반 수동식 요금징수 차로는 도류화하여 물리적으로 분리시켜야 함을 강조하였다[7]. Horiguchi et al.((2009)는 시뮬레이션을 통한 near-miss 분석으로 ETCS 설치차로가 어떠한 유형일 때 소통과 안전측면에서 바람직한지를 제시하였다. ETCS 차로 배치 방안을 결정하기 위해 Narashino 영업소를 비디오 촬영 후 컴퓨터가 영상이미지를 추적하는 기술을 이용하여 개별차량의 궤적을 그려냈다. 개별차량의 이동궤적을 이용하여 차량의 속도 및 가속도, 영업소 통과시간, near-miss 수 등의 데이터를 출력하고, 세 가지 유형별로 영업소 통행시간과 near-miss를 비교하였다[8]. 여기서 near-miss는 요금소 진입차량들간의 차두간격이 1초 이하로 줄어들어 두 대 중 적어도 한 대의 차량이 차로변경을 하는 경우를 뜻한다. 이러한 near-miss는 요금소 진입 차량들의 안전도를 결정하는 중요한 요소중의 하나로서 요금소 설계시 매우 핵심적으로 분석이 요구되는 항목이다.

Ahn(2011)은 하이패스 이용율을 높이는 주요 인자에 대한 연구 분석 결과 영향을 미치는 요인은 상시할인제와 출퇴근 할인제 인지여부가 가장 영향을 주고 있으며, 비 이용자의 향후 이용 의향은 통행시간 절감 만족도와 월평균 이용료가 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 하이패스의 만족도는 무정차 통행시간 절감이 가장 높은 것으로 채택되었다[9]. Choi(2011)은 영업소 진출로 최소 접속단거리를 연구 분석하고자 서울외곽순환고속도로 청계, 성남영업소와 영동고속도로 동수원 영업소에 대한 조사를 실시하여 하이패스 차로로부터 인접한 진출부까지의 85백분위 속도는 청계 89㎞/hr, 성남 74㎞/hr, 동수원 56㎞/hr로 나타났으며, 이를 근거로 적정 이격거리를 산출한 결과 청계, 성남은 각각 445m, 370m이고 동수원은 280m로 분석되었다. 결과적으로 성남, 동수원 영업소는 부족한 것으로 조사되었다[10].

3. 연구 차별성 및 범위

ETCS 차로 설치 및 운영 관련 문헌 및 현재 운영 기준 검토 결과, 하이패스 차로를 어떻게 배치·운영하는가는 영업소의 소통 및 안전에 민감한 영향을 주는 것으로 조사되었다. 또한 하이패스 차로를 어떤 방식으로 배치하는가에 따라, 하이패스 이용 형태와 차로별 이용률이 크게 변화함을 알 수 있었다. 특히 현재 하이패스 차로 선정 기준은, 하이패스 차로에 이용 교통량이 적절한 분산이 유도

되는가에 대한 관점보다는, 진출로를 이용하는 차량의 무리한 차로변경이 시도되지 않도록 설계차원의 최소한의 물리적 기준만을 제시하고 있다.

따라서 하이패스 차로를 이용하는 차량들이 영업소 조건에 따라 어떠한 반응을 나타내고 있으며, 이용 차량의 반응에 크게 영향을 주는 항목은 어떠한 요소가 있고, 이러한 요소 속에 상호 관계를 규명하여 교통량 분산에 활용하는 것이 매우 중요하다. 또한 요금소 기하구조와 교통특성이 TDR에 미치는 영향들을 규명하여 향후 영업소 설치 규모 및 차로 배치 방법을 제시하여 최적의 설계기준을 마련하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구의 핵심은 하이패스 교통량의 적정 분산에 영향을 주는 교통요인, 기하구조요인, 도로환경요인을 찾아내고, 이를 바탕으로 하이패스 차로의 적정 배치를 구현하여 하이패스 교통량의 분산을 유도하고자 하는 데 있다.

Ⅱ. 하이패스 운영 분석 및 모형

1. 현행 하이패스 설치 방법

우선적으로 현재 적용되고 있는 영업소 하이패스 차로배치 기준에 대해 검토해 보면 다음과 같다. 가장 기본적인 원칙은 추월차로인 도로 1차로를 하이패스차량에게 제공함으로써, 이동성을 최대한 확보하는 것이다. 따라서 하이패스 차로배치의 제1원칙은 1차로(좌측)에 Hi-pass 차로를 기본으로 설치하고 이용률이 증가함에 따라 옆차로로 확대 설치하도록 정해져 있다. 그러나 영업소에서 가장 인접한 인근 진출입로와의 이격거리(L_{er}, L_{or})가 짧을 경우, 즉 표준거리(원만한 차로변경이 어려운 상황)가 확보되지 못한 경우는 왼쪽차로 배치 원칙만을 고수할 수는 없다.

즉, 제1원칙에 의거하여 왼쪽차로에만 하이패스 차로를 설치 할 경우, 진출입 차량들이 급격한 차로변경을 시행하게 되고 영업소 진입광장부내에서의 차로변경으로 인해 지체 발생과 차량간 충돌 가능성이 높아지기 때문이다. 세부적으로 살펴보면, 인근 연결로와의 표준거리가 확보되지 못한 경우에는 왼쪽1차로로부터 X차로만큼 이격하여 설치하도록 규정하고 있다. 그러나 여기서도 소규모 영업소(4차로미만)는 진입 좌측, 중규모 영업소(4-9차로)는 중앙, 그리고 대규모(9차로초과)는 좌측과 중앙에 동시에 설치하는 것으로 세분화하고 있다.

기본적으로 현 기준의 가장 큰 특징은 본선형과 IC를 구분하지 않았다는 점이다. 두 영업소 형태는 교통 특성이 상이함에도 불구하고 동일한 기준으로 차로 배치를 시행하는 것은 다소 문제가 있다. 또 하나의 현실적 문제는, 잘못된 차로 배치는 특정 하이패스 차로에 교통량이 몰리는 현상이 발생할 수 있다는 점이다. 하이패스 이용률이 50%를 초과하면서 고속도로 주 교통량이 하이패스 차량으로 전도되어 하이패스 특정차로에 교통량 쏠림현상은 전체 영업소 소통에 악영향을 줄 수 있다.

2. 최적 하이패스차량 교통분산율

하이패스 차량이 여러 개의 하이패스 차로를 골고루 이용하도록 차로 배치를 하는 것이 가장 이상적인 차로배치일 것이다. 따라서 이를 측정하기 위해 TDR이라는 지표를 개발하였으며, 아래 (식 1)과 같다.

$$TDR = \frac{\prod_{i}^{n} H_i}{\prod_{i}^{n} H_\mu} \quad (1)$$

여기서, TDR = 하이패스차량 교통분산율

n = 하이패스 차로수

H_i = 하이패스차로 i의 이용교통량(대/시)

$H_\mu = \frac{\text{하이패스 전체 교통량(대/시)}}{n}$

TDR은 차로별 교통량이 평균들의 곱이 될 때 최대값을 갖는다. 즉, $\prod_{i}^{n} H_i$에서 $H_i = H_j = \cdots = H_k$ 일 때 최대값을 갖게 된다(여기서 H_i는 하이패스 i차로에서의 교통량). 이러한 변수가 어떠한 의미를 가지는지, 간단한 예를 들어 설명해 보면 다음과 같다.

A 영업소에 하이패스 차로가 3개가 배치되어 있고, 특정 시간대 하이패스 교통량이 300대라고 가정하자. 가장 이상적인 상황은 하이패스 차로별 교통량이 고르게 분포하는 것이 바람직할 것이다. 그렇다면 차로당 100대씩 나누어 이용하면 가장 좋은 상황일 것이다. 만약 100대씩 균등하게 이용할 경우, TDR은 1의 값을 가지게 된다. 그러나 현실적으로 1차로를 중심으로 하이패스 차로를 본선부터 유도하기 때문에, 100대식 나누어 움직이는 것은 사실상 불가능하다. 그러므로 최대한 하이패스 차로별 이용 교통량이 고르게 분산된다면, 1에 가까운 수치를 나타낼 것이며, 차로별 이용편차가 심할 경우에는 0에 가까운 수치를 나타낼 것이다.

하이패스 차로가 3개, 교통량이 300대인 경우에 차로별로 각각 200대, 50대, 50대가 이용한다면 TDR은 $\frac{200\times 50\times 50}{100\times 100\times 100}$ =0.5로 산정된다. 만약 차로별 교통량이 120대, 100대, 80대인 경우 TDR은는 $\frac{120\times 100\times 80}{100\times 100\times 100}$ =0.96이 된다. 후자의 예가 전자보다 더 고른 분포를 보이며, 이는 산출된 TDR을 통해 정량적으로 표현되게 된다.

3. 로지스틱회귀식

회귀분석은 변수간의 종속구조, 즉 독립변수와 종속변수의 관계를 규명하는 기법으로 독립변수와 종속변수가 주로 연속으로 측정된 경우에 사용된다. 본 연구에서는 TDR을 추정하기 위해 로지스틱 곡선식(logistic curve)을 활용하고자 한다. 이는 여기서 TDR이 확률과 같이 항상 0과 1사이에 존재할 수밖에 없으므로, 종속변수 값에 제한을 가할 수 없는 일반적인 회귀모형은 사용할 수 없기 때문이다[11].

먼저 TDR을 종속변수로 하고, 하이패스 교통량, 영업소 규모, 진출입로와 거리 등 TDR에 영향을 주는 요소들을 설명변수로 하여 로지스틱 회귀식을 구축한다. 즉 TDR에 영향을 주는 어떤 요인으로 생각되는 변수를 X_1, X_2, …, X_k라고 하면, 로지스틱 모형식은 (식 2)와 같이 표현된다.

$$TDR=\frac{1}{1+\exp(\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\cdots+\beta_kX_k)} \quad (2)$$

여기서, β_k : 매개변수
X_k : k번째 설명변수

여기서 (식 2)를 선형화하기 위해 1차 변환을 하면 아래에 제시된 (식 3)이 구해지고 여기에 로그를 취하면 선형화된 (식 4)가 구해진다. 이때 (식 4)는 일반 선형회귀식처럼 손쉽게 설명변수의 파라메타를 추정할 수 있게 된다.

$$\frac{1}{TDR}-1=\exp(\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\cdots+\beta_kX_k) \quad (3)$$

$$\log(\frac{1}{TDR}-1)=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\cdots+\beta_kX_k \quad (4)$$

앞에서 정의한 TDR은 하이패스 차로별 교통량이 적절하게 분산될수록 커지게 되며, 이에 반해 특정 차로에 교통량이 집중된다면 작아지는 형태를 갖는 변수이다. 따라서 TDR에 영향을 주는 독립변수들을 찾아낸 후 이를 로지스틱 회귀모형을 활용하여 이들 변수들과 TDR간의 상관관계를 추정하고자 한다.

Ⅲ. 모형구축 및 실험

1. 분석대상 및 자료

현재 본선형 영업소는 특정 하이패스 차로에 대한 이용 집중율이 높으며, 교통량이 많아 첨두시간대에 교통 지정체 현상이 발생하고 있어 차로별 적정 교통량 분산이 매우 중요한 요소로 대두되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 TDR에 대한 로지스틱 회귀모형 구축을 위한 실험을 수도권에서 실제 운영중인 본선형 영업소를 대상으로 수행하였다. 단 본선형 영업소 중, 하이패스 차로수가 1개인 영업

소와 거의 IC형에 가까운 유형을 제외한 13개 영업소에 대해서만 분석하였다.

모형구축 및 분석에 사용된 자료는 각 영업소별 2012년 일일 교통량 중 상위 30일 자료를 활용하였으며, 교통량이 적은 심야시간대(0시~6시)는 TDR 분석에 큰 의미가 없으므로 이를 제외하였다. 따라서 데이터 총 수는 13개 영업소×30일×18시간×2방향(입·출구)=14,040개를 일차적으로 활용하였다.

하이패스 차로별 교통량의 분포를 나타내는 TDR은 크게 영업소별 교통 특성, 기하구조 특성, 차로배치 위치에 따라 영향을 받게 될 것이다. 따라서 TDR 추정을 위해 선택 가능한 설명변수에 대해 살펴보면 다음과 같다.

1) 교통특성 변수

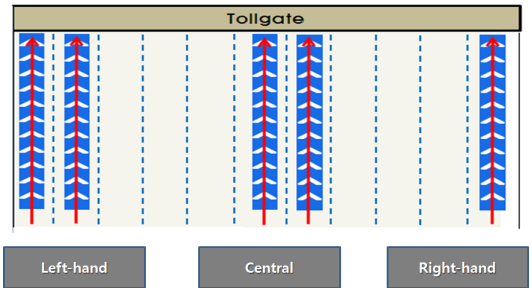
교통량 변수는 영업소의 규모, 즉 하이패스 booth와 일반 수동식 요금징수 booth 수를 결정하게 되며, 하이패스 차로별 이용교통량에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.

2) 기하구조 특성 변수

하이패스 차로별 교통량에 가장 큰 영향을 주는 요인으로는 인근 진출입로와 영업소간 이격거리일 것이다. 이격거리가 짧을 경우에는 진출입로를 이용하려는 차량은 급격한 차로변경을 해야 하는 상황이 올 수 있기 때문이다. 통상 진출입로에 따라 영향을 받지 않은 충분한 이격거리를 "표준거리"로 정의하는데, 표준거리에 미치지 못한 영업소의 경우 하이패스 차로 배치 위치에 따라 교통 혼잡 및 상충이 초래될 수 있다.

3) 차로배치 위치 변수

TDR에 가장 큰 영향을 주는 변수는 아무래도, 하이패스 차로배치 위치변수일 것이다. <그림 1>는 하이패스 차로배치 위치를 도식화한 것이다.

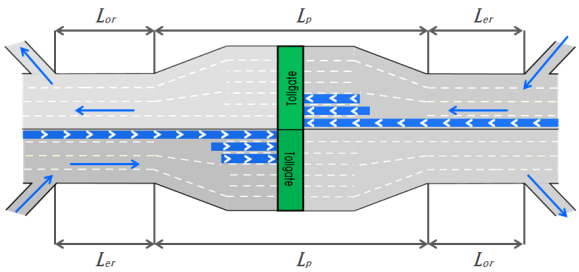


〈그림 1〉 하이패스차로 위치
〈Fig. 1〉 Location of Hi-pass lanes

하이패스 차로 위치는 크게 좌측, 중앙, 오른쪽으로 나눌 수 있다. 통상 왼쪽차로를 중심으로 하여 설치하되, 인근 진출입로와의 거리가 표준거리에 미치지 못할 경우에는 중앙에 배치하도록 규정되어 있다. 즉 본선형 영업소에는 왼쪽 차로에 하이패스 차로가 반드시 배치되어 있다. 이에 따라 본 연구에서는 이러한 하이패스 차로에 대한 위치 변수를 TDR 추정에 사용하였다. 하이패스차로 좌측배치비율(P_L)은 아래 (식 5)와 같으며, P_M,과 P_R도 같은 방식으로 산정할 수 있다.

$$P_L = \frac{\text{왼쪽에 배치된 하이패스 차로수}}{\text{하이패스 총 차로수}} \quad (5)$$

<그림 2>에서는 모형의 설명변수로 고려된 요금소 주변 진·출입 연결로와 광장부 제원과 관련된 변수들에 대한 정의를 보여주며, TDR에 상당한 영향을 주는 것으로 분석되었다.



〈그림 2〉 요금소의 물리적 설계 변수 정의
〈Fig. 2〉 Definition of physical design variables of a toll plaza

2. 모형 추정

TDR을 추정하는 로지스틱 회귀모형을 구축하기 위해서 먼저 유관된 변수들과의 상관관계를 분석하였다. 이를 통해 회귀모형 구축 전에 종속변수인 TDR과 독립 변수들 간의 관계를 가늠해 볼 수 있으며, 이를 통해 TDR에 긍정적인 요인과 부정적인 요인을 구분할 수 있다. 상관관계를 나타내는 상관계수(coefficient of correlation)는 두 변량 X, Y 사이의 상관관계의 정도를 나타내는 값이다. 측정값 (x, y)에 대하여 n개인 측정값 (x_1, y_1), (x_2, y_2), …, (x_n, y_n)이 주어졌을 때, 상관계수(r_{xy})는 아래의 (식 6)과 같다.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)s_x s_y} \quad (6)$$

여기서, $\bar{x}$, $\bar{y}$ = 각각 x, y의 평균값
s_x, s_y = 각각 x, y의 표준편차

상관계수 r은 항상 부등식 $-1 \le r \le 1$을 만족시키며, 양(+)의 상관관계가 있을 때는 $r > 0$, 음(-)의 상관관계가 있을 때는 $r < 0$이며, 상관성이 전혀 없을 때는 0이 된다. TDR과 긍정적인 관계(+ 부호)에 있는 변수로는 광장부 길이, 진입거리, 진출거리, 하이패스 차로배치 좌측비율 등이 도출되었으며, 이외에 총 booth 수와 하이패스 차로수, 하이패스 차로 배치 중앙비율 등 대부분의 독립변수들은 음의 상관관계를 나타내었다. TDR과 상관계수가 상대적으로 높은 변수를 살펴보면, 하이패스 booth 수(-0.556), 좌측 차로수(-0.449), 하이패스차로 배치 중앙비율(-0.442)로서 다른 독립 변수들에 비해 상대적으로 상관관계가 높은 것으로 분석되었으며, 회귀분석시 주요한 변수들로 활용 가능하다. 그 밖에 다른 독립변수들도 TDR과 비교적 상관관계는 낮지만 신뢰구간 95%(유의수준=0.05)에서 유의한 변수들로 채택되어 회귀분석시 독립변수로 사용하여 분석하였다.

회귀분석 모형은 1차적으로 구축된 14,040개 sample 자료를 활용하여 구축하였다. 이후 모형에서 산출 가능한 TDR 추정치와 실측치간의 차이가 많이 발생하는 이상치 자료 2,477개를 제외한 후 최종적으로 11,563개의 자료를 사용하여 2차 회귀분석을 시행함으로써 (식 7)의 모형을 도출하였다.

$$TDR = \frac{1}{1 + e^{\left(\begin{matrix}\beta_0 + \beta_1 V_H + \beta_2 L_P + \beta_3 L_{er} + \beta_4 L_{or} \\ + \beta_5 B + \beta_6 H_L + \beta_7 P_M + \beta_8 P_R\end{matrix}\right)}} \quad (7)$$

여기서, V_H = 하이패스 교통량
L_P = 광장부 길이
L_{er} = 진입 연결로와의 이격거리
L_{or} = 진출 연결로와의 이격거리
B = 총 booth 수
H_L = 하이패스 좌측 차로수
P_M = 하이패스 중앙배치비율
P_R = 하이패스차로 우측배치비율

분석 대상 영업소인 13개의 본선형 영업소를 대상으로 하여, TDR 모형을 추정한 결과는 <표 1>과 같으며, 최적 모형 선정은 SPSS 통계프로그램을 활용하여 의미가 없는 변수를 하나씩 소거해 가는 backward elimination을 적용하였다[12].

〈표 1〉 모형 추정결과
〈Table 1〉 Model estimation results

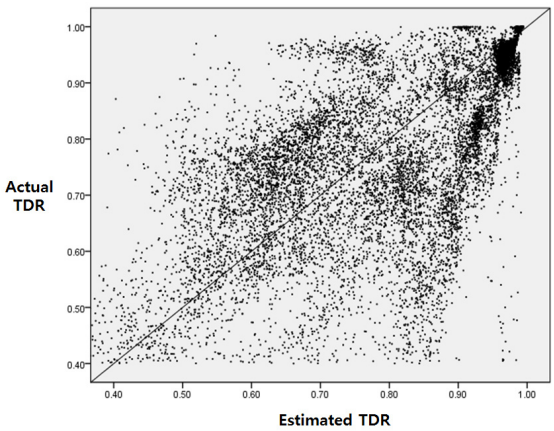
Var.	Coeff.	Std. Error	*t*-value	*p*-value
Const.	-2.8992	.106	-27.445	.000
V_H	-.0006	.000	-29.450	.000
L_P	-.0016	.000	-27.491	.000
L_{er}	-.0008	.000	-7.503	.000
L_{or}	-.0014	.000	-14.839	.000
B	-.1122	.004	-26.983	.000
H_L	1.7294	.022	77.259	.000
P_M	5.9338	.092	64.356	.000
P_R	3.8437	.141	27.222	.000

R^2 = 0.503, Number of sample = 1,563

모형에서 채택된 설명변수 중에 부호가 (+)인 경우에는 TDR을 감소시키는 것이며, 반대로 부호가 (-)인 경우는 TDR을 증가시키게 된다. 모형에서 채택된 변수들에 대하여 각각의 의미를 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 하이패스 교통량(V_H)이 많을수록 TDR은 증가하게 된다. 즉 하이패스 교통량이 적은 경우, 대체로 왼쪽 1차로를 중심으로 이용하기 때문에 교통량이 많을수록 분산 이용형태가 커지는 것으로 해석할 수 있다. 둘째, 광장부 길이(L_P)가 길어질수록 TDR이 커지게 된다. 즉 영업소 광장부 길이가 충분할 경우 하이패스 차량이 차로 변경 선택에 여유를 가질 수 있기 때문인 것으로 추정된다. 셋째, 진입연결로와의 이격거리(L_{er})와 진출 연결로와의 이격거리(L_{or}) 역시 (-) 부호가 나왔다. 이는 인근 연결로와의 간격이 충분히 고려되었을 경우, TDR이 증가한다고 할 수 있다. 이는 연결로와의 거리가 충분한 거리를 확보하고 있을수록 차로 선택의 여유를 가질 수 있기 때문으로 추정되며 이는 광장부 길이가 길수록 TDR이 커지는 것과 같은 맥락으로 볼 수 있다. 넷째, 총 booth 수(B)가 많은 수록, 즉 대형영업소일수록 TDR이 높아짐을 알 수 있다. 즉 교통량이 많은 대규모 영업소일수록 TDR이 높게 나타나는 현상으로 추정된다. 다섯째, 하이패스 차로 배치 위치를 나타내는 설명변수 중, 하이패스차로 좌측배치 수(H_L), 하이패스차로 중앙배치비율(P_M), 우측배치비율(P_R)이 채택되었는데, 이들 변수의 수준이 높아질수록 TDR이 감소하는 것으로 분석되었다. 여기서 본 연구의 핵심사항 중 하나가 중앙 또는 우측이냐에 대한 선택문제였는데, 우측배치비율(P_R)의 계수 값이 중앙배치비율의 계수 값보다 작아 중앙에 배치하는 것보다 우측에 배치할 때 분산율이 더 작아지지 않음을 의미하며 반대로 이야기하면 중앙보다는 우측에 배치하면 TDR이 더욱 증가하는 것으로 판단할 수 있다.

본 연구에서 도출된 8개의 설명변수이외에, 하이패스 차로들간의 이격거리, 또는 일반차로와 하이패스차로간의 이격거리와 같은 변수들도 TDR에 영향을 줄 수도 있을 것으로 여겨진다. 그러나, 이와 같은 변수들은 본 연구에서 수행된 사례분석에서는 TDR에 대한 설명력이 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이는 본 연구의 사례분석대상이 수도권에 위치한 교통량이 상당히 많은 본선 영업소들이기 때문에 요금소 진입이전에 이미 차로별로 교통량이 일정 부분 분산되어 있어, 하이패스차로의 이격거리가 TDR에 별다른 영향을 주지 않은 것으로 해석된다. 그러나, 통행량이 적은 비첨두시간대나 규모가 작은 영업소의 경우에는 하이패스 차로간의 이격거리와 일반차로와 하이패스차로간 이격거리가 TDR에 통계적으로 유의한 영향을 줄 수 있으므로, 이에 대한 검토가 요구된다.

<그림 3>은 TDR 추정모형을 통해 산출된 TDR 추정치와 실제 관측된 TDR을 비교한 그림이다. 추정력이 높은 상태는 실제 TDR과 추정 TDR이 같은 값을 가지는 경우가 많으나, 영업소 형태가 워낙 다양한 규모 및 기하구조, 교통 특성을 가지고 있어 결과치 밴드가 넓게 형성되고 있으며 중앙선을 중심으로 결과치가 집중되는 현상을 발견할 수 있다.



〈그림 3〉 실제와 추정 TDR간의 관계
〈Fig. 3〉 Relationship between the actual and estimated TDRs

모형의 추정치와 실제관측치가 기울기가 1인 대각선을 중심으로 고르게 분포되어 있는 것은 TDR과 여러 설명변수들간의 복잡한 상관관계에도 불구하고, 본 연구에서 추정한 로지스틱 회귀모형식이

평균적으로는 실제 상관관계를 잘 묘사하고 있다고 해석할 수 있다. 또한 <그림 3>을 통해 TDR이 크거나 작은 경우에 모형의 설명력이 상대적으로 매우 높은 것을 파악할 수 있다. 이는 영업소 기하구조 또는 교통특성이 매우 차별적인 상황에서는 TDR이 매우 극단적으로 나타날 수 있기 때문인 것으로 해석된다.

3. 사례분석

앞에서 본선 영업소의 하이패스 차로별 이용교통량 분포인 TDR을 추정할 수 있는 로지스틱 모형을 개발하였다. 최종 모형에서는 총 8개의 영업소 관련 설명변수가 선택되었고, TDR 추정 모형에서 채택된 설명변수들에 대한 그 의미를 해석해 보았다.

본 절에서는 현재 운영중인 2개 영업소를 대상으로 하이패스 차로 배치 위치를 변경해 가면서, 어떤 배치가 가장 적합하지를 TDR 모형을 활용하여 검증해 보고자 한다. 모형에 채택된 설명변수들 중에서 하이패스 차로 위치별 배치비율을 나타내는 3가지 변수들인 H_L, P_M, 그리고 P_R의 값을 변화시켜 보면서 TDR 측정하면, 이러한 Hi-pass 차로 위치 조정에 따라 TDR이 얼마나 변화하는지를 찾아낼 수 있다.

실험 분석 대상은 시흥영업소와 구리영업소로 선정하고 관련 자료를 수집하였다. 먼저, 분석 자료에서 이용된 2012년 교통량 자료 중에서 상위 30개의 평균교통량을 활용하였다. 두 영업소는 개방식 도로 구간에 위치한 본선형 영업소이며, 총 booth 수가 24개(시흥), 29개(구리)로 대규모 영업 시설이다. 현재 두 영업소의 하이패스 차로는 왼쪽차로와 중앙부에 설치되어 있다. 본 실험에서는 두 영업소의 중앙에 설치된 하이패스 차로를 우측으로 이전하였을 때, TDR이 어떻게 변하는지를 살펴보았으며, 이때 다른 설명 변수들은 Hi-pass 차로 변경 전후에 동일하다고 가정하였다. 즉 현재의 영업소의 주요 설명변수를 (식 7)에 대입하여 TDR을 산출하고, 차로배치 위치를 변경하였을 때의 설명변수를 넣어 추정된 TDR′를 산출하여 그 결과를 비교하였다.

분석 결과를 살펴보면 시흥영업소 상행의 경우에 현재 하이패스 차로 배치로는 TDR이 0.557로 비교적 낮은 값을 보였으나, 중앙에 있는 하이패스 2개 차로를 우측으로 이동시키게 되면 TDR′은 0.744로 크게 개선되는 것으로 나타났다. 시흥영업소 하행의 경우에도 중앙차로 1개를 우측으로 이동시키면 TDR이 0.708에서 0.804로 다소 증가함을 볼 수 있다.

구리영업소의 경우 또한, 중앙에 하이패스 차로를 배치되어 있는 현행 방식에서는 TDR이 0.722(상행), 0.743(하행)인 반면에 Hi-pass 차로를 우측으로 이동시켰을 경우에는 TDR이 각각 0.857, 0.869로 높아짐을 알 수 있다.

Ⅵ. 결론

본 연구는 각 영업소에 배치되어 있는 하이패스 차로별 교통량이 왜 다른가, 이를 개선할 수는 없는가에 대한 의문에서부터 출발하였다. 즉, Hi-pass 차로별 이용율이 고르지 않다면, 영업소는 차량간 상충과 감속으로 인한 지체 현상이 가중될 수 있기 때문이다. 따라서 하이패스 차로별 이용교통량이 제대로 분산되지 못하는 결과를 초래한 요인을 찾아내고, 이를 개선할 수 있는 방법론을 제시하는데 본 연구의 주된 목적이 있다.

먼저 각 영업소마다 배치된 하이패스 차로에 균등한 교통량이 이용되었는가를 평가할 수 있는 "TDR"이란 평가지표를 개발하였고, 이러한 TDR에 영향을 주는 주요 요인을 찾아내기 위해, 영업소 형태 및 기하구조, 진출입 연결로 특성, 교통 특성, 차로배치 현황 등 여러 가지 독립변수를 포함한 로지스틱 회귀모형을 개발하였다. 모형 추정 결과에 따르면 하이패스 교통량, 광장부 길이, 진입연결로와의 거리, 진출연결로와의 거리, 좌측 하이패스 차로수, 중앙배치비율, 우측배치비율 등의 변수들이 TDR에 영향을 주는 것으로 파악되었다. 이중 하이패스 차로배치 항목 중 좌측 하이패스 차로수, 중앙

배치비율, 우측배치비율 등의 위치변수가 핵심 요소로 분석되었으며, 이에 따라 하이패스 차로별 균형적 배분을 위해서는 Hi-pass 차로 위치의 선정이 가장 중요한 것으로 나타났다. 이와 함께 개발된 모형을 활용하여 하이패스 차로 위치 변경에 따라 TDR이 어떻게 변화됨을 실제 사례를 통해 분석해 보았으며, 이를 통해 효율적 차로배치가 하이패스 교통량의 효율적 분산을 유도할 수 있음을 보여주었다.

본 연구결과를 토대로 하이패스 차로별 균등한 교통량 배분을 유도하기 위해 어떠한 요인을 조정해야 하는지를 파악할 수 있게 되었다. 그러므로, 하이패스 차로 설계 및 운영 시에 본 연구에서 제안한 TDR 추정 모형을 활용한다면, 영업소별 고유특성을 반영함으로써 최적의 Hi-pass 차로 위치를 결정하여 요금소의 운영 효율를 획기적으로 개선할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구결과는 영업소의 하이패스 차로배치 적정 여부를 쉽고 빠르게 검증할 수 있어, 수많은 대안들을 검토해야 하는 영업소 설계시에 효과적이며 영업소 기하구조에 따라 하이패스를 위치를 사전 결정함에 따라 시설 설치규모 및 차로 폭원확보를 보다 용이하게 반영할 수 있으므로 현장 실무에서의 활용성이 매우 높다고 할 수 있다.

본 연구에서는 본선형 영업소만을 대상으로 시행되었으며, 향후에 IC에 위치한 영업소 유형에 대해서도 추가적인 연구가 필요할 것으로 여겨진다. 특히, 지방부에 위치한 하이패스 차로수가 2개이하인 소규모 영업소의 경우에는 하이패스 차로간의 이격거리 또는 일반차로와 하이패스차로간 이격거리와 같은 변수들이 TDR에 영향을 줄 수 있으므로, 이러한 요금소 설계요소들에 대한 새로운 분석이 필요하다. 또한, 영업소에는 하이패스 차량만이 아닌 일반 차량도 존재하기 때문에 일반 차량의 균형적 배분을 위해 하이패스 차로를 어떻게 배치할 것인가에 대한 연구도 요구된다.

참고문헌

[1] Korea Highway Corporation, *Press Release,* Retrieved Aug. 12, 2013, from http://www.ex.co.kr/portal/cus/public_relations/press_release/.

[2] Y. S. Bae, *Development of Optimal Toll Plaza Design and Operation Standards Based on ETCS Utilization,* Ph.D. Dissertation, Ajou University, Feb. 2011.

[3] C. Emmanuel, J. J. Madrigal, A. U. Mappala, and H. S. Palmiano, “Allocation of electronic toll collection lanes at toll plazas considering social optimization of service time and delay,” in Proc. *The 6th Int. Conf. of the Eastern Asia Society for Transportation Studies,* pp.1496-1509, Bangkok, Thailand, Sep. 2005.

[4] S. C. Wong, N. N. Sze, W. T. Hung, P. Y. Becky, and H. K. Lo, “The effects of a traffic guidance scheme for auto-toll lanes on traffic safety at toll plazas”, *Safety Science,* vol. 44, no. 9, pp.753-770, Nov. 2006.

[5] A. Polus and I. Reshetnik, "A new concept and a manual for toll plaza planning", *Canadian Journal of Civil Engineering,* vol. 24, no. 4, pp.532-538, Aug. 1997.

[6] Y. S. Cho, H. J. Kim, S. K. Lee, and Y. T. Lee, “Development and application of the microscopic tollgate simulator using SIMPLUS”, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers,* vol. 22, no. 6-D, pp.1045-1055, Nov. 2002.

[7] FHWA, *Strategies for Improving Safety at Toll Collection Facilities,* May 2008.

[8] R. Horiguchi, T. Shitama, H. Akahane, and J. Xing, *Traffic Simulation for an Expressway Toll Plaza Based on Successive Vehicle Tracking Data: Chapter 11 Transport Simulation* - Beyond Traditional Approaches, EPFL Press, 2009.

[9] J. K. Ahn, *A Study on the Influencing Factors for*

the Hi-pass Choice Mechanism among Expressway Users, M.Sc. Dissertation, Hanyang University, Aug. 2011.

[10] S. I, Choi, *A Study on the Appropriate Distance from ETCS Booth to Outflow Lane,* M.Sc. Dissertation, Ajou University, Aug. 2011.

[11] S. P. Washington, M. G. Karlaftis, and F. L. Mannering, *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis,* CRC Press, 2011.

[12] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers, and K. Ye, *Probability and Statistics for Engineers and Scientists,* Prentice Hall, 2007.

저자소개

이 재 수 (Lee, Jae-Soo)
2013년 8월 :아주대학교 석사(교통공학전공)
2010년 11월 ~ 현 재 : 한국도로공사 감사팀장
2002년 1월 : 중앙고속도로 건설 공로 국무총리 표창 수상
1990년 2월 : 강원대학교 토목공학과 졸업
1989년 12월 : 한국도로공사 입사

이 기 영 (Lee, Ki-Young)
1993년 2월 : 한양대학교 교통공학과 학사 (공학사)
1995년 2월 : 한양대학교 대학원 교통공학과 교통계획 (공학석사)
2006년 2월 : 한양대학교 대학원 교통공학과 안전/교통공학 (공학박사)
2013년 1월 ~ 현 재 : 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원
2013년 1월 ~ 현 재 : 서울시 교통영향분석 및 개선대책 심의위원

이 철 기 (Lee, Choul-Ki)
1998년 2월 : 아주대학교 박사(교통공학 전공)
1991년 2월 : 아주대학교 석사(교통공학 전공)
2011년 ~ 현 재 : 아주대학교 교통시스템공학과 부교수

윤 일 수 (Yun, Ilsoo)
2006년 1월 : University of Virginia 박사 (교통공학 전공)
2009년 ~ 현 재 : 아주대학교 교통시스템공학과 조교수
2008년 ~ 2009년 : 한국교통연구원 교통투자분석센터 책임연구원

유 정 훈(Jeong Whon Yu)
2002년 12월: Purdue University 공학박사(Transportation and Infrastructure Systems Eng.)
2005년 3월 ~ 현 재: 아주대학교 공과대학 교통시스템공학과 부교수
2003년 8월 ~ 2005년 2월: 한국교통연구원 광역도시교통연구실 책임연구원
E-mail : jeongwhon@ajou.ac.kr
연락처 : 031)219-1650