교차로 신호위반 단속카메라 설치가 차량사고에 미치는 영향

이상혁¹ · 이용두² · 도명식^{1*}

¹ 한밭대학교 도시공학과, ² 코넬대학교 토목환경공학과

Safety Impacts of Red Light Enforcement on Signalized Intersections

LEE, Sang Hyuk¹ · LEE, Yong Doo² · DO, Myung Sik^{1*}

¹ Urban Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

² Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca NY 14853, The United States

Abstract

The frequency and severity of traffic accidents related to signalized intersections in urban areas have been more serious than those in both arterial segments and crosswalks. Especially, traffic accidents involved with injuries and fatalities have caused by traffic signal violations within intersections. Therefore, many countries including Korea have installed the red light enforcement camera (RLE) to reduce traffic accidents associated with the traffic signal violation. Meanwhile, many methodologies have been studied in terms of safety impacts estimation of red light enforcement, which, however, cannot be easy to conduct. In this study, safety impacts was estimated for intersections of Chicago downtown area using SPF models and EB approach. As a result, for all crash types and target traffic accident types such as "angle", "rear end", "sideswipe in the same and other directions", "turn", and "head on", fatal crashes were reduced by 26% and 38%. However, RLE may increase property-damage-only-crashes by 3.23% and 1.16%, respectively.

도시지역의 교통사고 중 교차로와 관련한 교통사고가 교통사고 건수와 교통사고 심각도에서 가로구간이나 횡단보도 관련 교통사고에 비해 높게 나타나고 있다. 특히 교차로에서 신호위반으로 인한 교통사고는 다른 교통사고유형과는 달리 중상과 경상에 관련된 교통사고비율이 높은 것으로 나타나고 있다. 이에 우리나라는 물론이고 많은 외국에서 신호위반으로 인한 교차로 교통사고를 줄이기 위하여 교차로 신호위반 단속카메라를 설치하고 있다. 이와 더불어 교차로 신호위반 단속카메라의 교통사고 감소에 미치는 효용에 대한 연구가 계속 이루어지고 있으나 신호위반 단속카메라만의 효과를 분석하기란 쉽지가 않다. 따라서 본 연구에서는 미국 Illinois주 Chicago시의 다운타운의 교차로 관련 데이터를 이용하여 SPF모형을 개발하고 개발된 모형을 활용하여 EB방법으로 교차로 신호위반 단속카메라의 효용에 대하여 분석하였다. 분석 결과, 목표로 지정한 교통사고 유형(측면직각추돌, 후방추돌, 같은 방향 측면추돌, 반대 방향 측면추돌, 회전시 추돌, 그리고 정면충돌)과 전체 교통사고유형 모두가 교차로 신호위반 단속카메라의 영향을 받는 것으로 나타났다. 전반적으로 신호위반 단속카메라 사망사고가 약 26% 감소한 것으로 나타났으며, 전체 사고는 5.49% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 대물교통사고의 경우 3.23% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 목표로 한 사고유형에 대한 교통사고효과 분석에서는 사망사고는 약 38% 감소한 것으로 나타났으며 전체 사고의 경우 1.46% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 대물교통사고의 경우 1.16% 증가하는 것으로 나타났다.

Key Words

Empirical Bayesian Approach, Negative Binomial Regression, Red Light Enforcement, Safety Performance Function, Zero-Inflated Poisson with Normal Heteroskedasticity
EB 방법, 음이항회귀모형, 교차로 신호위반 단속카메라, SPF 모형, 이분산성의 영과잉 포아송 모형

*: Corresponding Author
msdo@hanbat.ac.kr, Phone: +82-42-821-1192, Fax: +82-42-821-1185

Received 11 May 2012, Accepted 29 November 2012

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

우리나라는 1970년대 이후로 급격한 경제성장을 이루어왔으며, 이에 따라 도시화가 급격히 진행되었다. 또한, 경제성장과 더불어 생활수준의 향상으로 자동차 대중화가 이루어져 1997년에는 전국자동차 등록대수가 1,000만대를 넘어서 현재는 약 1,844만대(2011년 11월 말)를 넘어서고 있다. 2000년도 이후 도시 내의 교통량이 급격히 늘어남에 따라 교통사고도 교통량 증가에 비례하여 급증하고 있는 실정이다. 우리나라의 교통사고는 2010년 226,878건이 발생하여 5,505명이 사망하고 352,458명이 부상을 당하였으며, 이는 사회적·경제적 손실이 막대하다는 것을 의미한다(KoROAD, 2012).

도시지역의 교통사고 중 교차로와 관련한 교통사고가 교통사고 건수와 교통사고 심각도면에서 가로구간이나 횡단보도 관련 교통사고에 비해 높게 나타나고 있다. 특히 교차로에서 신호위반으로 인한 교통사고는 다른 교통사고유형과는 달리 중상과 경상에 관련된 교통사고비율이 높은 것으로 나타나고 있다(Retting et al., 1999).

우리나라의 교차로에서의 신호위반이 범규위반별 분석에서 약 12%를 차지하여 안전운전불이행 다음으로 높은 것으로 나타났으며(Kim et al., 2011), 교차로에서의 신호위반에 의한 교통사고는 인적요인에 의하여 발생하는 사고로 교통경찰에 의한 단속과 계도가 유일한 방지대책으로 알려져 있다. 따라서 2000년대에 들어서면서 교차로에서의 신호위반을 효율적으로 단속하기 위해 교차로 신호위반 단속카메라(Red Light Enforcement)를 설치하기 시작하였으며 현재는 전국적으로 많은 교차로에 설치되어 단속을 하고 있다. 하지만 교차로 신호위반 단속카메라의 설치 전·후에 대한 자료의 미비와 비교 분석 방법의 부재로 교통사고감소에 대한 효과 분석이 제대로 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내의 교통사고 상세 데이터와 각 교차로 방향별 교통량 정보의 취득이 어려운 관계로 미국의 Illinois주 Chicago의 다운타운의 위치하고 있는 교차로를 대상으로 교차로 신호위반 단속카메라의 교통안전에 대한 효용성을 분석하고 또한 어떤 요인들이 교차로 교통사고에 영향을 미치는지 살펴봄으로써 향후 우리나라 데이터를 분석할 때 활용하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구는 미국 시카고의 중심상업지구인 Loop지역과 주거지역이 밀집되어 있는 다운타운지역의 신호위반 단속카메라 설치에 따른 교통사고감소 효과를 분석하기 위하여 2004년부터 2010년까지의 신호위반 단속카메라가 설치되어 있는 교차로와 그렇지 않은 교차로에 대한 지형정보(Geometric Information), 교통사고정보(Traffic Accident Information), 교차로 교통량정보(AADT) 그리고 교차로 신호정보(Signalized Traffic Controls) 등을 조사·분석 하였다. 조사·분석된 자료를 NLOGIT 4.0과 EXCEL 2010을 이용하여 SPF(Safety Performance Function)와 EB(Empirical Bayesian)방법으로 교차로의 신호위반 단속카메라의 설치 전·후의 교통사고건수와 교통사고심각도의 변화를 비교·분석하였다. 또한 교통사고유형에 따른 교통사고 감소효과를 비교하기 위하여 교차로의 전체 교통사고유형과 신호위반으로 인한 교통사고유형인 측면직각추돌(Angle), 후방추돌(Rear End), 같은 방향 측면추돌(Sideswipe in Other Direction), 반대방향 측면추돌(Sideswipe in Same Direction), 회전시 추돌(Turn), 그리고 정면충돌(Head on)에 관하여 분석하였다.

Figure 1. Proposed study procedure

II. 기존문헌 고찰

Retting et al. (2003)은 교차로 신호위반 단속카메라의 신호위반과 교통사고 감소효과를 분석하기 위하여 영국과 미국 외 여러 나라의 연구 자료를 분석하였다. 그 결과 신호위반 감소효과는 설치장소에 따라 증가하거나 감소하는 것으로 나타났으며, 교통사고 감소효과는 설치장소, 교통사고자료조사기간에 따라 증가하거나 감소하는 것으로 분석하였다. 그러나 교통사고유형 중 우측직각추돌과 후방추돌의 경우 교차로 신호위반 단속카메라에 직접적인 영향을 받는 사고유형으로 전체적으로 사고율이 감소하는 것으로 분석하였다.

또한, Retting et al. (2002)과 Schneider (2010)은 각각 California주 Oxnard와 Louisiana주 Lafayette의 교차로 교통사고데이터에 대하여 교차로 신호위반 단속카메라 설치 전·후의 교통사고 효과분석을 실시하였다. 교차로 신호위반 단속카메라의 설치 후 전체 교통사고는 각각 약 7% 와 약 13% 정도 감소하는 것으로 분석되었다. 더욱이 교통사고유형 중 우측직각추돌의 경우는 각각 32%와 33% 감소하는 것으로 분석되어 신호위반 단속카메라가 교통사고유형 중 우측직각추돌에 가장 효과적이라는 결론을 내었다.

Fitzsimmons et al. (2007)는 2001년부터 2006년까지의 Iowa주 Bluffs와 Davenport의 교차로 신호위반 단속카메라에 관한 데이터를 수집하여 단속카메라의 교통안전에 대한 효과를 단순 통계학 기법과 Bayesian기법을 이용하여 분석하였다. 분석결과, Bluffs시에서 단속카메라가 설치되어 있는 교차로의 경우, 설치 전·후의 총 교통사고와 후방추돌 변화율은 각각 44.0%와 49.0% 감소하는 것으로 나타났으며, 이외의 교통사고는 90.3% 감소하는 것으로 분석하였다. 이에 반해 신호위반 단속카메라가 설치되지 않은 교차로의 경우 같은 기간 동안 총 교통사고와 후방추돌은 각각 11.8%와 28.6% 감소하였으며 이외의 교통사고의 경우 감소가 전혀 없는 것으로 분석되었다. 또한, Davenport시의 경우 신호위반 단속카메라가 설치되어있는 교차로에서는 설치 전·후의 총 교통사고가 20.0% 감소하는 것으로 나타났으며 후방추돌의 경우 효과가 없었던 것으로 분석되었다. 또한 신호위반 단속카메라가 설치되지 않은 교차로의 경우 같은 기간 동안 총 교통사고는 7.0% 감소하는 것으로 나타났으나 후방추돌의 경우 33.0% 증가하

는 것으로 분석되었다.

Washington et al. (2005)은 교차로 신호위반 단속카메라의 효과를 분석하기 위하여 Arizona주 Scottsdale과 Phoenix의 교차로를 대상으로 수집한 데이터를 4가지의 분석방법으로 분석하였다. 분석에 이용한 4가지 방법으로 1) 신호위반 단속카메라 설치 전·후 교통사고건수를 단순 통계학으로 분석하는 방법, 2) 교통사고에 가장 큰 영향을 미치는 교통량을 고려한 신호위반 단속카메라 설치 전·후 교통사고분석, 3) 신호위반 단속카메라가 설치되어 있는 교차로와 설치되어 있지 않고 운영되는 교차로를 비교대상으로 하여 설치 전·후 교통사고분석 그리고 4) EB를 활용한 교차로 신호위반 단속카메라 설치 전·후 교통사고를 분석하였는데, 교차로 안전효과의 분석에서 Spillover 효과와 평균으로의 회귀(Regression to the mean) 문제를 해결하기 위하여 EB 방법을 활용한 단속카메라의 효과분석이 가장 적합한 것으로 분석하였다.

Synectics Transportation Consultants (2003)은 Canada Ontario의 신호위반 단속카메라가 설치되어 있는 6개 지역에 대하여 1995년부터 1999년까지의 데이터를 수집하여 SPF를 개발하여 EB방법으로 단속카메라의 설치 전·후의 교통사고 예방효과에 대하여 분석하였다. 그 결과 교차로 전체 교통사고는 신호위반 단속카메라가 설치되어있는 경우 설치되지 않은 교차로에 비해 약 16% 교통사고 감소효과가 있는 것으로 분석되었다. 또한 사망사고와 중상사고의 경우 단속카메라가 설치된 경우 그렇지 않은 경우에 비해 약 6.8% 감소효과가 있는 것으로 분석되었으나, 대물사고의 경우 18.5% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 측면직각추돌에 대한 교통사고는 사망사고와 부상사고의 경우 약 25.3% 그리고 대물사고의 경우 17.9% 감소하는 것으로 분석되었다. 하지만 사고유형 중 후방추돌의 경우 49.9% 증가하는 것으로 나타났다.

그러나 기존연구에서는 교차로 신호위반 단속카메라 설치 전·후의 단순 통계학적 비교만 실시하거나, EB방법을 이용하여 단속카메라의 효과를 분석하였지만 SPF의 모형 개발 시 교통사고가 발생하지 않은 해당연도의 교차로 교통사고 특성을 고려하여 모형화하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 EB방법과 교통사고데이터에서 교통사고 발생건수가 없는 경우를 고려한 SPF 모형 개발로 교차로 신호위반 단속카메라의 교통사고안전에 대한 효과를 분석하고자 한다.

III. 연구의 범위 및 이론적 고찰

1. 데이터 수집 및 처리

본 연구는 미국 Illinois주 Chicago시의 중심상업지구(CBD)인 Loop와 상업지구와 주거지구가 혼재되어 있는 다운타운을 중심으로 데이터를 수집하였으며, 공간적 범위로 북쪽으로 North Avenue, 서쪽으로 Western Avenue, 남쪽으로 Roosevelt Road의 총 232개의 교차로를 대상으로 자료를 수집하였다.

Chicago 다운타운지역은 금융 중심의 비즈니스지구와 쇼핑 중심의 상업지구는 물론이고 인구가 밀집하여 주거할 수 있는 높은 주거용 건물 중심의 주거지구가 밀집되어 있는 곳으로 야간시간대를 제외하고 교통수요가 많이 발생하는 지역이다.

본 연구에서는 EB방법을 이용하여 교차로 신호위반 단속카메라의 교통사고에 대한 효과를 분석하기 위하여 교차로를 3가지 타입으로 분류하였다. Type I은 교차로 신호 현대화(Signal Modernization: 신호교차로에서 신호등이 기존의 보행도 위에 설치되는 것을 차도 위로 설치하여 운전자의 신호등 시인성을 좋게 함)와 함께 신호위반 단속카메라가 설치되어 있는 교차로로 연구범위인 총 232개 교차로 중 12개의 교차로가 이에 해당된다. Type II는 신호 현대화만 시행되어 있는 교차로로 연구범위에서 4개 교차로가 이에 해당된다. 또한 신호위반 단속카메라가 설치된 교차로와 비교하기 위하여 비교 그룹으로 선정된 교차로 Type III는 아무런 개선이 시행되지 않은 교차로를 선정하였는데 연구범위에서 20개 교차로가 이에 해당된다. 그리고 나머지 196개 교차로는 신호위반 단속카메라나 신호 현대화의 시행시기가 본

Figure 2. Study area in Chicago

Table 1. Classified intersections of study area

	Type I	Type II	Type III
Contents of Classification	Red Light Enforcement + Signal Modernization	Signal Modernization Only	without Improvement
Number of Intersections	12	4	20
Number of Injury	388	178	453
Number of PDO	1,116	438	1,135
Average of AADT	47,857	44,212	41,717
Average Total Number of Lane	8	7	6
Average of Speed Limit(mph)	35	33	31
Number of Traffic Signal	12	4	12

연구의 자료수집기간과 일치하지 않아 분석에서 제외하였다.

각 Type별 교차로에 대하여 2004년부터 2010년까지의 지형정보(차선수, 차선폭, 중앙선폭, 안전표지판 설치유무 등), 교통사고정보(교통사고건수, 교통사고심각도, 교통사고발생 시 외부환경, 교통사고발생시간 등), 교차로 교통량(AADT) 그리고 교차로 신호정보 등을 수집하여 분석에 활용하였다. 각 수집된 데이터는 SPF 모델링과 EB분석을 위하여 하나의 데이터파일로 만들어 분석에 활용하였다.

2. SPF 모형

SPF는 교통사고의 발생건수(응답변수)에 영향을 미치는 요인들(설명변수)을 이용하여 교통사고 예측 및 분석하기 위한 통계학적 모형이다.

본 연구에서는 EB 분석방법을 이용하여 교차로 신호위반 단속카메라의 교통사고에 대한 효과를 분석하기 위해 비교그룹인 Type III 교차로(신호위반 단속카메라와 신호 현대화가 시행되지 않은 교차로)에 대한 지형정보, 교통사고 정보, 교통량 정보 등을 이용하여 SPF를 모형화하여 Type I과 Type II 교차로의 신호위반 단속카메라와 신호 현대화가 시행되기 이전의 데이터를 적용하여 교통사고를 예측하였다.

본 연구의 SPF 모형을 산출하기 위하여 교통사고 발생건수를 응답변수(Response Variable)로 하고 교통사고에 영향을 미친다고 판단되는 요인인 AADT, 각 방

항별 차로수, 차선폭, 중앙분리대 폭, 제한속도, 일방통행유무 등을 설명변수(Explanatory Variable)로 선택하여 SPF를 모형화하였다. 특히 AADT의 경우 AADT의 크기에 따라 교통사고의 유형과 심각도가 달라질 수 있기 때문에 본 연구에서는 AADT를 10,000대 단위로 분할하여 설명변수로 활용하였다.

교통사고발생에 대한 SPF 모형은 주로 포아송 모형(Poisson Model)과 음이항 모형(Negative Binomial Model)을 이용한다. 그 이유는 1) 교통사고 데이터가 항상 양의 수(Non-Negative)이고 교통사고 발생이 이산적(Discrete)이므로 선형모형이 적당하지 않으며, 2) 교통사고 데이터의 오차항(Error Terms, Residual)이 선형모형처럼 정규분포의 형태를 띄지 않기 때문이다. 또한 기존연구에서도 SPF 모형의 경우 포아송 모형과 음이항 모형을 주로 이용하여 개발하였다(Jeong et al. 2009; Lord et al. 2005; Washington et al. 2005).

1) 포아송 회귀모형

포아송 모형은 각 교차로에서 발생하는 교통사고가 각각 독립적으로 발생하는 것을 전제로 하고 주어진 시간 또는 기간에서 교통사고가 발생할 확률을 모형화한 통계학 분포로 일반식은 식(1)-(2)와 같다.

$$P(Y=y_i) = \frac{\mu_i^y e^{-\mu_i}}{y_i!} \quad (1)$$

$$\mu_i = \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_{ij}) \quad (2)$$

여기서,

$P(Y=y_i)$: 주어진 기간 동안 i교차로에서 y_i번의 교통사고가 발생할 확률

μ_i : 주어진 기간 동안 i교차로에서 발생한 기대 교통사고건수

x_{ij} : 설명변수

β_i : 계수

또한 포아송 회귀모형(Poisson Regression)은 우도함수(Likelihood Function)를 적용한 최우추정법(Standard Maximum Likelihood Method)을 이용하여 모형을 개발할 수 있다.

$$L(\beta) = \sum_{i=1}^n (y_i \log \mu_i - \mu_i - \log y_i) \quad (3)$$

여기서,

β : 계수($\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$)의 벡터값

y_i : i교차로에서 관측된 교통사고건수

μ_i : i교차로에서 예측된 교통사고건수

2) 음이항 회귀모형

포아송 회귀모형의 가장 큰 한계는 각 응답변수의 분산이 분산의 평균과 같아야 한다는 것으로 만약 분산이 분산평균보다 크다면(과분산, Over-Dispersion) 계수 벡터 β 는 편향(Biased)된다는 것이다. 이런 포아송 회귀모형의 한계를 극복하기 위해서 음이항 분포(포아송 모형의 일반적 유형)를 이용하여 교통사고건수를 예측할 수 있다(Jovanis et al. 1985).

음이항 분포는 포아송 회귀모형에서 포함되지 않은 변수로 인한 과분산을 모형에 반영하여 교차로의 교통사고확률을 모형화한 통계학적 분포로 일반식은 식(4)-(5)와 같다.

$$P(Y=y_i) = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + y_i\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right) y_i!} \cdot \left[\frac{1}{(1+\alpha\mu_i)}\right]^{\frac{1}{\alpha}} \cdot \left[1 - \frac{1}{1+\alpha\mu_i}\right]^{y_i} \quad (4)$$

$$Var(Y) = \mu_i(1 + \alpha\mu_i) \quad (5)$$

여기서,

α : 최우추정법에 의해 예측된 과포화 Parameter

Γ : 감마함수

$Var(Y)$: 분산

또한 음이항 회귀모형(Negative Binomial Regression)은 우도함수를 적용한 최우추정법을 이용하여 모형을 개발할 수 있다.

$$LL(\beta) = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\sum_{j=0}^{y_i} \log(1 + \alpha \cdot j) \right] - \log(1 + \alpha \cdot y_i) \right. \\ \left. + y_i \cdot \log \mu_i - (y_i + \alpha^{-1}) \log(1 + \alpha \cdot \mu_i) \right. \\ \left. - \log(y_i!) \right\} \quad (6)$$

여기서,

α : 과포화 Parameter

β : 계수($\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$)의 벡터값

y_i : i교차로에서 관측된 교통사고건수

μ_i : i교차로에서 예측된 교통사고건수

3) 영과잉 방법

교통사고데이터에는 조사대상년도 중 교통사고건수가 전혀 없는 교차로가 있을 수 있으므로 이런 경우는 영과잉 포아송 모형(Zero-Inflated Poisson) 또는 영과잉 음이항 모형(Zero-Inflated Negative Binomial)으로 분석이 가능하다(Lord et al. 2005). 영과잉(Zero Inflation) 방법은 반응값이 0인 부분과 0이 아닌 부분으로 나누어 분석하는 방법으로 확률변수 Y 는

$$Y \sim \begin{cases} 0 & \text{with Probability } p_i \\ P(Y = y_i) & \text{with Probability } 1 - p_i \end{cases}$$

이다. 여기서 $0 \leq p_i < 1$ 이다.

또한 영과잉 포아송의 기본모형은 식(7)-(8)과 같고 영과잉 음이항의 기본모형은 식(9)-(10)과 같다.

$$P(Y=0) = p_i + (1-p_i)e^{-\mu_i} \quad (7)$$

$$P(Y = y_i \neq 0) = (1-p_i) \frac{\mu_i^{y_i} e^{-\mu_i}}{y_i!} \quad (8)$$

$$P(Y=0) = p_i + (1-p_i) \left[\frac{1}{(1+\alpha\mu_i)} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (9)$$

$$P(Y = y_i \neq 0) = (1-p_i) \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + y_i\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right) * y_i!} \cdot \left[\frac{1}{(1+\alpha\mu_i)} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \cdot \left[1 - \frac{1}{1+\alpha\mu_i} \right]^{y_i} \quad (10)$$

본 연구에서는 교통사고분석에 많이 사용하고 있는 포아송 회귀모형, 음이항 회귀모형 그리고 영과잉 포아송과 음이항 등의 모형에 대하여 SPF모형의 적용성을 검증하였다. 또한 모형구축의 방법은 교차로의 교통사고 정보를 응답변수로 하고 교차로 지형정보, 교통량 정보, 교차로 신호정보 등의 특성을 설명변수로하여 단계적 방법(Stepwise Manner)을 이용하여 교통사고 유형별, 심각도별 사고빈도추정 모형인 SPF 모형을 개발하였다.

3. EB 방법에 의한 교통사고 효과분석

1) EB방법을 이용한 시행 이전의 교통사고빈도 예측

통계학적으로 표본의 크기가 커질수록 표본의 평균이 모집단의 평균과 비슷해지는 평균으로의 회귀(Regression to the mean)가 나타나게 된다. 교통사고빈도의 경우 데

Figure 3. Illustration of EB approaches (Li et al. 2010)

이터 수집년도에 따라 평균보다 많을 수도 또한 적을 수도 있으므로 이런 왜곡을 보정하기 위해 EB분석방법을 널리 활용하고 있다. 교차로 Type I과 Type II에서 신호위반 단속카메라와 신호 현대화가 시행되기 이전의 교통사고에 대해 EB분석방법으로 보다 정확한 사고빈도를 예측할 수 있다. 또한 EB방법은 관측된 데이터와 예측된 데이터와의 관계를 보정하는 통계학적 기법으로 개념도는 Figure 3과 같다. 그리고 EB방법에 의한 신호위반 단속카메라와 신호 현대화가 시행되기 이전의 교통사고 예측식은 식(11)-(12)와 같다(Li et al. 2010).

$$EB_B = w \times P_B + (1-w) \times O_B \quad (11)$$

$$w = \frac{1}{1 + [\alpha \times (N) \times \sum_{n=1}^N P_{n,B}]} \quad (12)$$

여기서,

EB_B : EB방법으로 분석된 신호위반 단속카메라와 신호현대화 시행 이전의 교통사고빈도

w : 가중치

P_B : SPF에서 계산된 신호위반 단속카메라와 신호 현대화 시행 이전의 교통사고 예측치

O_B : 신호위반 단속카메라와 신호 현대화시행 이전의 교통사고 관측치

α : 과포화 Parameter

$P_{n,B}$: n년도의 SPF에서 계산된 신호위반 단속카메라와 신호 현대화 시행 이전의 교통사고 예측치

2) EB방법을 이용한 시행 이후의 교통사고빈도 예측

교차로 Type I과 Type II에서 신호현대화와 신호위

반 단속카메라가 설치되어 있지만 설치시기부터 지금까지 현대화와 단속카메라가 시행되지 않았다고 가정하고 EB분석방법으로 사고빈도를 예측하게 된다. 이 예측은 신호위반 단속카메라와 신호 현대화 시행 이전과 이후의 년평균일일교통량(AADT)에 의하여 계산된다. 이는 시행 이전과 이후의 지형정보 등이 교통사고에 영향을 미치는 요인의 변화가 거의 없고, AADT와 같은 교통량의 증감이 교통사고발생에 영향을 미치는 것으로 나타났기 때문에 EB분석방법에 의해 시행이후의 교통사고는 시행 전과 후의 AADT의 비율을 고려하여 계산한다(Li et al. 2010).

$$EB_A = EB_B \times \left[\frac{\sum_{m=1}^M (AADT_{n,major} + AADT_{n,minor})}{\sum_{n=1}^N (AADT_{n,major} + AADT_{n,minor})} \right] \quad (13)$$

여기서,

EB_A : EB방법으로 신호위반 단속카메라와 신호 현대화가 시행되지 않았다고 가정했을 때의 교통사고빈도

$AADT$: 년평균 일일교통량

m : 신호위반 단속카메라 설치 이후의 년도

n : 신호위반 단속카메라 설치 이전의 년도

3) EB방법을 이용한 신호위반 단속카메라의 효과 분석

EB방법으로 분석된 교차로 Type III(비교그룹)의 교통사고빈도와 교차로 Type I과 Type II의 시행이후 교통사고빈도를 비교하여 교통사고 증감률을 분석한다. 증감률 분석에서 Type I의 증감률은 신호위반 단속카메라와 신호 현대화에 따른 효과이므로 신호위반 단속카메라의 교통사고안전에 대한 효과를 분석하기 위하여 Type II(신호 현대화 시행 교차로)의 교통사고안전에 대한 효과를 차감시켜야 한다.

IV. 신호위반 단속카메라의 교통사고효과분석

1. SPF 모형 개발

본 연구에서는 교차로 Type III(비교그룹)의 SPF 모형을 개발하기 위해서 교차로의 교통사고빈도를 응답변수로 하고 수집된 교차로의 지형정보, 교통량 정보 그리고 신호정보를 설명변수로 하여 NLOGIT4.0 econometrics

소프트웨어를 이용하여 모형을 개발하였다.

SPF 모형의 개발은 1) 수집한 데이터를 예비분석하여 설명변수로 지정된 변수의 교통사고에 미치는 영향에 대하여 분석한 후 교차로 교통사고 요인이 되는 변수를 지정하고, 2) SPF 모형 개발에 이용하는 여러 가지의 모델에 교차로 교통사고에 영향을 많이 미치는 설명변수를 넣어서 단계적 방법(Stepwise Manner)으로 분석을 시행하고, 3) 마지막으로 교차로 SPF 모형을 교통사고 심각도 (전체 교통사고, 부상 교통사고, 대물 교통사고)로 구분하여 최적 모형을 산정하였다.

이와 같은 방법으로 SPF 모형을 개발한 결과, 전체 교통사고, 부상교통사고, 대물교통사고 모두에서 이분산성의 영과잉 포아송 모형(Zero-Inflated Poisson with Normal Heteroskedasticity)이 가장 적합한 것으로 분석되었다. 이는 분석 대상 교차로의 교통사고 데이터에 교통사고가 특정년도에 한건도 발생하지 않은 교차로가 존재하여 이를 개선한 이분산성의 영과잉 포아송 모형이 가장 적합한 것으로 해석되었다.

Table 2는 각 교통사고 모형에 대한 모형 적합도를 나타낸 것으로 전체 교통사고에 대한 신뢰도 R^2 는 0.898, 부상교통사고는 0.678 그리고 대물교통사고는 0.854로 매우 양호하게 나타났다. 또한 영과잉 모형의 적합도를 볼 수 있는 Vuong Test의 경우 3개의 모형이 전부 1.96이상으로 나타나 영과잉 모형이 적합한 것으로 분석되었다. 그리고 과포화 Parameter(α)의 경우, 값이 0-1 사이의 값을 가지는데 0에 가까울수록 과분산이 없다는 것으로 각 교통사고 모형으로 포아송 모형이 유효하다는 의미이다. 본 연구에서 분석한 각 교통사고 SPF 모형의 과포화 Parameter값은 0.002-0.078로 통계학적으로 유효한 것으로 나타났다.

Table 2. Validation of SPF development

		All Crashes	Injury Crashes	PDO Crashes
Log Likelihood Function		-347.427	-258.342	-320.694
AIC		6.218	4.655	5.749
BIC		6.386	4.823	5.917
McFadden Pseudo R ²		0.898	0.678	0.854
Vuong Test		2.941	3.312	2.108
Dispersion Parameter α/ mile/year	Coefficients	0.078	0.389	0.079
	Standard Error	0.025	0.097	0.029
	P-Value	0.002	0.000	0.007

Table 3. Coefficients of calibrated SPF models

Model	All Crash Type					Injury Crashes					PDO Crashes				
	Constant	ln (Major AADT)	Number of Lanes	AADT $\leq$ 40,000	All Stop	Constant	ln (Major AADT)	AADT $\leq$ 40,000	All Stop	Traffic Signal	Constant	ln (Major AADT)	Speed Limit	Two way Stop	Width of Left Turn Pocket
Coefficients	-2.854	0.514	0.035	0.235	-0.386	-3.561	0.479	0.276	-0.364	0.248	-1.468	0.671	-0.031	0.285	-0.038
Standard Error	1.389	0.137	0.018	0.109	0.129	1.801	0.179	0.184	0.244	0.189	1.588	0.107	0.007	0.129	0.023
P-Value	0.040	0.000	0.050	0.032	0.003	0.048	0.008	0.133	0.136	0.188	0.355	0.000	0.000	0.027	0.099

본 연구에서 개발된 SPF모형은 전체 교통사고의 경우 Table 3에서와 같이 유효한 설명변수는 $\ln(\text{AADT})$, 차로수, $\text{AADT} \leq 40,000$ 대, 그리고 교차로의 All Stop 여부가 영향을 미치는 것으로 분석되었으며 각 변수의 통계학적 유의성을 판단하는 기준인 P-Value는 0.000-0.050으로 매우 양호하게 나타났다.

부상교통사고의 경우 $\ln(\text{AADT})$, $\text{AADT} \leq 40,000$ 대, Allway Stop 그리고 신호통제여부가 교통사고에 영향을 미치는 것으로 분석되었으며 각 변수의 P-Value는 0.008-0.188로 양호한 것으로 나타났다.

또한 대물교통사고의 경우 $\ln(\text{AADT})$, 제한속도, Tway Stop, 그리고 좌회전전용차로폭이 영향을 미치는 것으로 분석되었으며 각 변수의 P-Value는 0.000-0.099로 나타났다.

분석된 각 설명변수를 살펴보면 AADT, 차로수, 신호통제여부 등은 양(+)의 계수로 나타났으며 이는 AADT, 차로수 등이 늘어날수록 교통사고 빈도가 높아진다는 의미이다. 또한 제한속도, Allway Stop 그리고 좌회전전용차로폭은 음(-)의 계수로 값이 커지면 커질수록 교통사고빈도가 줄어든다는 의미로 해석이 가능하다.

2. EB 방법에 의한 분석결과

본 연구에서는 EB 방법을 이용하여 교차로 Type I과 Type II에 대하여 신호위반 단속카메라와 신호 현대화가 시행되기 이전의 교통사고 예측치(EB_B)를 관측데이터와 SPF에서 예측된 데이터를 이용하여 산출하였다. 또한 EB_B 를 각 교차로의 각 년도의 AADT를 이용하여 교차로 Type I과 Type II를 대상으로 신호위반 단속카메라와 신호 현대화가 시행되지 않았다고 가정했을 때의 교통사고 예측치(EB_A)를 산정하고, 이를 관측 데이터와 비교하여 신호위반 단속카메라가 교통사고에 미치는 영

Table 4. Reduction in all crash types and target crashes from EB approach

Crash Type	Intersection Type	Total Reduction	
		All Crash Type	Target Crash
Fatal	I	-52.78%	-45.432
	II	-26.67%	-7.44%
Reduction by Red Light Enforcement		-26.11%	-37.98%
Injury	I	-31.19%	-28.81%
	II	-10.71%	-2.88%
Reduction by Red Light Enforcement		-20.48%	-25.93%
PDO	I	+1.22%	+0.85%
	II	-2.01%	-0.31%
Reduction by Red Light Enforcement		+3.23%	+1.16%
All Crashes	I	+0.78%	+0.20%
	II	-4.71%	-1.26%
Reduction by Red Light Enforcement		+5.49%	+1.46%

향을 분석하였다.

또한 기존연구에서 분석된 신호위반 단속카메라에 영향을 받는 사고유형(Target Crashes)인 측면직각추돌, 후방추돌, 같은 방향 측면추돌, 반대방향 측면추돌, 회전시 추돌, 그리고 정면충돌의 6가지 유형을 이용하여 분석하였는데 분석 결과는 Table 4와 같다.

Table 4는 EB 방법으로 전체교통사고유형과 신호위반 단속카메라에 영향을 많이 받는 교통사고유형에 대하여 분석한 결과이다. 분석결과는 교차로 Type I의 효과에서 Type II의 효과를 차감하여 교차로 교통사고의 요인 중 신호위반 단속카메라의 영향을 분석한 것이다.

분석 결과, 전체교통사고유형에서 신호위반 단속카메라가 설치된 이후 사망사고는 26.11% 그리고 부상사고는 20.48% 감소하는 것으로 분석되었다. 하지만 대물

사고의 경우 3.23% 증가하는 것으로 나타났는데 이는 신호위반 카메라의 설치가 운전자에게 심리적 요인으로 작용하여 급정거나 급가속이 많이 발생하여 증가하는 것으로 분석되었다.

또한 신호위반 단속카메라에 영향을 많이 받는 교통사고유형(측면직각추돌, 후방추돌, 같은 방향 측면추돌, 반대 방향 측면추돌, 회전시 추돌, 그리고 정면충돌)의 경우 사망사고는 37.98% 그리고 부상사고는 25.93% 감소하는 것으로 나타나 전체교통사고유형보다 사고발생빈도가 더욱 줄어드는 것으로 나타났다. 그리고 신호위반 단속카메라의 영향을 많이 받는 교통사고유형에서 대물사고의 경우 발생빈도가 1.46% 증가하는 것으로 나타나 이 역시 운전자의 심리적 요인으로 인해 급정거 및 급가속으로 인한 단순접촉사고가 증가한 것이 원인으로 판단된다.

전체적으로 나타난 결과에서 교차로에 설치된 신호위반 단속카메라는 교통사고발생빈도에서 전체교통사고유형과 신호위반 단속카메라에 영향을 많이 받는 교통사고유형 각각 5.49%, 1.46% 증가하는 것으로 나타났으나 교통사고 심각도는 감소시키는 효과가 있다고 분석할 수 있다.

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 미국 Illinois 주 Chicago시의 2004-2010년까지의 7년간의 교차로 지형정보, 교통사고정보, 교차로 교통량 그리고 교차로 신호정보 등을 이용하여 Chicago시의 다운타운에 설치된 교차로 신호위반 단속카메라의 설치 전·후의 교통사고에 대한 효과를 EB방법(EB Approach)을 이용하여 분석하였다.

EB방법을 이용하여 신호위반 단속카메라의 효과를 분석하기 위하여 먼저 대상구간의 교차로를 3가지 Type (Type I: 신호위반 단속카메라와 신호 현대화 시행, Type II: 신호 현대화 시행, Type III: 신호위반 단속카메라와 신호 현대화가 시행되지 않은 교차로)으로 분류를 하였다. 분류된 교차로 Type 중 Type III에 대하여 SPF 모형을 개발하여 신호위반 단속카메라와 신호 현대화 시행 이전의 교통사고빈도를 예측하였다. 본 연구에서 개발된 SPF모형은 이분산성의 영과잉 포아송 모형(Zero Inflated Poisson with Normal Heteroskedasticity)이 가장 적합한 것으로 나타났으며, 모형의 신뢰도는 교통사고 심각도에 따라 $R^2 = 0.678-0.898$ 로 매우 양호

한 것으로 나타났다. 개발된 SPF모형에서는 조사대상 교차로 중 2004년과 2010년 사이에 교통사고가 한건도 발생하지 않은 교차로가 존재하므로 영과잉(Zero Inflation)이 적합한 모형인 것으로 나타났다. (Vuong Test = 2.108-3.312)

구축된 SPF 모형을 이용하여 EB분석을 실시하였으며, 그 결과 전체 교통사고에서 사망사고는 약 26% 감소하는 것으로 나타났으며, 전체 교통사고발생빈도는 5.49% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 교차로 신호위반 단속카메라가 교차로의 전체교통사고빈도를 증가시키는 효과가 있는 것으로 판단 할 수 있으나, 교통사고 심각도면에서 사망사고를 현격히 감소시키는 것으로 분석되어 교통안전에 대한 효과는 있는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 분석대상구간이 Chicago시의 다운타운으로 한정하여 연구가 시행되어 Chicago시 전체에 대한 교통특성이 반영되지 않았다는 한계가 있다. 따라서 향후에는 시 전체에 대한 신호위반 단속카메라의 교통안전에 대한 영향분석이 시행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 분석기간이 2004년부터 2010년까지 7년간의 데이터를 이용하여 분석하였지만 향후에는 매년 추적분석을 시행하여 신호위반 단속카메라의 효과를 분석할 필요성이 있는 것으로 사료된다. 또한, 향후 교차로에 설치된 신호위반 단속카메라의 설치비용과 운영비용을 교통사고 감소효과편익과 비교하여 경제성 분석이 이루어지면 교차로 신호위반 단속카메라의 효과를 좀 더 세밀하게 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- Council F. M., Persaun B., Lyon C., Eccles K., Griffith M. (2005), Safety Evaluation of Red-Light Camera, U.S. Department of Transportation, FHWA-HRT-05-048.
- Fitzsimmons E. J., Hallmark S., McDonald T., Orellana M., Matulac D. (2007), The Effectiveness of Iowa's Automated Red Light Running Enforcement Programs, Center for Transportation Research and Education, CTRE project 05-226.
- Garber N. J., Miller J. S., Abel R. E., Eslambolchi S., Korukonda S. K. (2007), The Impact of Red Light Cameras (Photo-Red Enforcement) on Crashes in Virginia, Virginia Transportation Research Council, FHWA/VTRC 07-R2.

- Hauer Z. (2001), Overdispersion in Modelling Accidents on Road Sections and in Empirical Bayes Estimation, *Accident Anal, Prevent.* 33, pp.799-808.
- Jeong S. B., Hwang B. H., Sung N. M., Lee S. H. (2009), Development of Evaluation Model for Black Spot Improvement Priorities by using Empirical Bayes Method, *J. Korean Soc. Transp., Vol.27, No.3, Korean Society of Transportation*, pp.81-90.
- Jovanis P. P., Chang H. (1985), Modeling the Relationship of Accidents to Miles Traveled, *Transportation Research Record 1068, TRB, National Research Council*, pp.42-51.
- Kim S. Y., Choi J. S., Kim M. K., Sung H. J. (2011), Analysis of the Crash Reduction Effects of the Red Light Camera Systems and Determination of the User Benefits, *J. the Korea Institute of Intelligent Transport Systems Vol.10, No.1*, pp.1-15.
- Kim T. Y., Park B. H. (2009), Effects of Accident Reduction according to the Installation of Red Light Camera by Accident Type Using EB method, *Proc. Korea Planners Association in Fall*, pp.415-422.
- KoROAD (2012), www.koroad.co.kr
- Kwak Y. H. (2006), An Effect Analysis on the Improvement Strategies of Traffic Accident Area using Empirical Bayes Method, *Master's Degree Thesis, Hanyang University*.
- Li Z., Lee S. H., Lee Y. D., Zhou B., Bamzai R. (2010), A Methodology for Assessing the Safety Impacts of Highway Shoulder Paving, *ASCE, T & DI Congress, Chicago, IL*.
- Lord D., Washington S. P., Ivan J. N. (2005), Poisson, Poisson-Gamma and Zero-Inflated Regression Models of Motor Vehicle Crashes: Balancing Statistical fit and Theory, *Accident Anal, Prevent.* 37, pp.35-46.
- Retting R. A., Ferguson S. A., Hakkert A. S. (2003), Effects of Red Light Cameras on Violations and Crashes: A Review of the International Literature, *Traffic Injury Prevention*, 4:1, pp.17-23.
- Retting R. A., Kyrychenko S. Y. (2002), Reductions in Injury Crashes Associated with Red Light Camera Enforcement in Oxnard, California, *American J. Public Health*, 92(11), pp.1822-1825.
- Retting R. A., Ulmer R. G., Williams A. F. (1999), Prevalence and Characteristics of Red Light Running Crashes in the United States, *Accident Anal, Prevent.* 31, pp.687-694.
- Retting R. A., Williams A. F., Farmer C. M., Feldman A. F. (1999), Evaluation of Red Light Camera Enforcement in Oxnard, California, *Accident anal, Prevention* 31. pp.169-174.
- Schneider H. (2010), Effectiveness of Red-Light Cameras for Reduction the Number of Crashes at Intersections in the City of Lafayette, Louisiana Department of Transportation.
- Synectics Transportation Consultants Inc. (2003), Evaluation of The Red Light Camera Enforcement Pilot Project, Ontario Ministry of Transportation.
- Walden T. D. (2008), Analysis on the Effectiveness of Photographic Traffic Signal Enforcement Systems in Texas, *Traffic Department of Transportation*.
- Washington S., Shin K. (2005), The Impact of Red Light Camera (Automated Enforcement) on Safety in Arizona, Report No. FHWA-AZ-05-550, Arizona Department of Transportation.

✉ 주 작 성 자 : 이상혁
 ✉ 교 신 저 자 : 도명식
 ✉ 논문투고일 : 2012 5. 11
 ✉ 논문심사일 : 2012 8. 19 (1차)
 2012 11. 6 (2차)
 2012 11. 29 (3차)
 ✉ 심사판정일 : 2012 11. 29
 ✉ 반론접수기한 : 2013. 4. 30
 ✉ 3인 익명 심사필
 ✉ 1인 abstract 교정필