

경험적 베이즈 방법에 의한 공용중인 고속도로 교통안전진단사업의 효과평가

Evaluation of Road Safety Audit on Existing Freeway by Empirical Bayes Method

문 승 라 Mun, Sung Ra | 정희원 · (주)경화엔지니어링 교통계획부 이사 (E-mail: mun7007@hanmail.net)

ABSTRACT

Road safety audit is the preventive enhancement strategy for safety. It gets rid of beforehand the potential factor of a traffic accident in the stage of road planning and design and it evaluates the appropriation for road geometric structure or safety facility to prevent traffic accident in the stage of operation after the construction. Since this strategy is introduced to our country in the early 2000s, various projects have been processed and it was legislated recently. And now, the evaluation of past project for its continuation is needed. Therefore, in this study the evaluation of road safety audit on existing freeway is performed. The spatial extent of this study is Yong-dong line on which the safety treatment was executed in 2005 and 2006. And, the temporal range of this study is each 2-year of before and after from 2005 and 2006. The empirical bayes method of observational evaluation studies is applied to analyze. As a result, there is an effect of improvement on most of treated sections. But there is ineffective or negligible on some sections. Compared with the detail of treatment on each section, the effect of multiple or various treatments is good for that section. On the other hand, the section on which effect doesn't appear is the result of single or unimportant treatments. Throughout these results, the concrete analysis can be performed and the countermeasures designed for the section on which effect doesn't appear. Also it is used as reference to the future plan and direction of road safety audit on existing freeway.

KEYWORDS

road safety audit, empirical bayes methods, existing freeway

요지

도로교통 안전진단은 도로의 계획 및 설계단계에서부터 교통사고가 발생할 수 있는 요소를 찾아내 미리 개선하고 건설 후 운영단계에도 도로구조나 안전시설이 사고방지에 적정한지를 평가하는 예방적 차원의 안전성 강화 제도이다. 이 제도는 2000년대 초에 우리나라에 소개된 이래 다양한 사업이 진행되어 왔고 법제화되었으며, 사업의 지속화를 위해 현재까지 진행된 사업에 대한 평가가 필요한 시점이다. 이러한 필요성에 따라 본 연구에서는 공용중인 고속도로의 교통안전진단사업에 대한 효과 평가를 수행하였다. 연구의 공간적 범위는 영동고속도로이며 2005년과 2006년도에 시행된 안전진단사업에 대해 전후 2년을 평가기간으로 하여 분석하였다. 평가방법은 관찰적 사전·사후 평가방법 중 경험적 베이즈 방법을 적용하였다. 효과평가 결과 사업이 시행된 대부분의 구간에서 개선효과가 있는 것으로 나타났으나 일부 구간에서는 효과가 없거나 미미한 것으로 나타났다. 이를 각 구간별 개선조치 내용과 비교하여 검토한 결과 해당 구간에 여러 개선조치가 시행된 경우 효과가 양호하게 나타났으며, 효과가 나타나지 않는 구간은 개선조치가 적거나 단일한 경우가 일반적이었다. 이러한 결과를 바탕으로 개선효과가 나타나지 않는 구간에 대해서는 구체적인 분석과 대응책 마련이 가능할 것이다. 또한 향후 공용중인 고속도로 안전진단사업의 사업내용 및 방향설정 등에 참고로 활용될 수 있다.

핵심용어

도로교통 안전진단, 경험적 베이즈 방법, 공용중인 고속도로

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

도로 및 교통시설의 사고감소 및 안전성 향상을 위해 사고 잦은 곳 개선사업, 위험지역 개량사업, 어린이보호구역 개선사업 등 다양한 형태의 안전개선사업이 시행되고 있다. 이러한 안전성 개선사업의 하나로서 도로교통안전진단(Road Safety Audits)이 있다. 이는 도로의 계획 및 설계단계에서부터 교통사고가 발생할 수 있는 요소를 찾아내 미리 개선하고 건설 후 운영단계에도 도로구조나 안전시설 등이 사고방지에 적정한지를 평가하는 예방적 차원의 안전성 강화제도이다. 영국 교통부는 도로안전진단을 “도로이용자의 안전에 영향을 미치는 도로의 물리적 요소들 및 그 상호작용에 대한 체계적인 평가”라고 정의하고 있으며 이 사업을 처음 도입하여 제도화하였다. 국내에서는 1994년부터 도로교통안전진단에 대한 논의가 시작되었고, 건설교통부(현, 국토해양부)의 제5차 교통안전기본계획에서 도로교통안전진단 제도의 도입을 처음으로 명문화하였다. 이후 도로교통안전진단 도입에 대한 논의가 지속적으로 추진되어 국도에서의 시범사업과 공용중인 고속도로 안전진단사업을 추진하였다. 이외에도 2008년에 개정된 교통안전법에서 도로교통안전진단사업에 대한 규정을 강화하여 일반교통안전진단과 특별교통안전진단으로 사업 내용을 구분하였고, 일반교통안전진단에서는 신설도로에 대한 설계단계에서의 안전진단을 의무로 규정하였다. 이에 따라 공용중인 도로 뿐 아니라 신설도로 중 법령에 해당하는 범위에 대해 안전진단이 시행되고 있다. 이렇듯 10여년에 가까운 기간 동안 도로교통안전진단이 법으로 명문화되고 다양한 사업으로 시행되었음에도 불구하고 이 사업의 효과에 대한 평가 연구가 이루어지지 않았다. 이 사업은 사고 잦은 곳 개선사업과 같이 지점을 중심으로 사고감소를 목표로 하는 사업이나 특정시설에 대한 개량사업에서 개념이 확장되어 도로의 구조와 주행에서의 안전성과 편의성, 쾌적성의 확보를 위한 예방적 차원의 모든 안전조치를 포괄하는 계획으로서 향후 지속적으로 사업이 추진되어야 할 것이다. 도로교통안전진단사업이 가진 이러한 취지에 따라 사업을 지속화, 안정화하기 위해 현재까지 진행된 사업에 대한 평가가 이루어져야 할 것이다. 따라서 본 연구에서는 현재까지 진행되었던 도로교통안전진단 중 고속도로 한 개 노선을 선정하여 효과평가를 수행하고 그 결과를 바탕으로 사업의 의미를 되짚어 보고자한다.

본 연구에서는 국내에서 시행되었던 여러 형태의 안

전진단 중에 공용중인 고속도로의 안전진단사업을 대상으로 하였다. 2003년부터 시행되어온 공용중인 고속도로의 교통안전진단사업은 매년 2~3개 노선을 선정하여 꾸준히 진행되었다. 2007년 기준으로 도로공사 관내 총 25개 노선 3,127.5km 중 안전진단사업이 계획되어 완료되었거나 진행 중에 있는 노선은 11개 노선, 총 1,584.7km로써 이는 전체 고속도로의 50% 정도에 해당한다. 또한 2011년 기준으로 도로공사 관내 총 31개 노선 3,632km 중 20개 노선 2,676km에 사업이 시행되어 75% 가량 도로사업이 추진되었으나 신설노선 등에 사업이 시행될 수 없음을 감안하면, 사실상 대부분의 노선에 사업이 추진되어 사업이 거의 완료되었다고 할 수 있다. 따라서 현 단계에서 그동안 추진된 사업에 대한 효과평가는 사업의 성과를 되짚어보고 앞으로 지속되어야 하는가에 대한 의사결정에 참고가 될 수 있을 것이다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구의 목적은 공용중인 고속도로 안전진단사업에 대한 효과평가이다. 평가방법은 관찰적 사전·사후 평가 방법 중 경험적 베이즈 방법(empirical bayes method)에 의한다. Hauer(1997)에 의해 제안된 이 평가방법은 사후 개선사업 미시행 가정 시에 대한 예측치를 경험적 베이즈 관계식을 통해 산출하고 이를 시행 시의 실제 사고와 비교하여 평가한다. 이 방법은 사고에서 나타나는 평균으로의 회귀현상(regression-to-the-mean)을 반영해줌으로써 이로 인한 편이가 제거되어 더 정확한 평가결과를 도출할 수 있다는 장점으로 인해 평가연구에서 많이 활용되어 왔다.

연구의 공간적 범위는 영동고속도로로 선정하였다. 영동고속도로 안전진단사업은 2004년에 계획되어 개선조치는 2005년부터 이루어졌다. 본 연구에서는 2005년도와 2006년도에 시행된 조치를 평가대상으로 하였고, 2003년부터 2007년까지를 분석대상기간으로 하였다. 이에 따라 2005년 개선조치의 경우 사전기간은 2003~2004년, 사후기간은 2006~2007년이 시간적 범위가 된다. 또한 2006년 개선조치의 경우에는 사전기간은 2003~2005년, 사후기간은 2007년이 된다. 비교를 위한 참조그룹은 분석대상기간 동안 안전진단사업이 시행되지 않은 고속도로 전 노선이 가용한 대상이 되며, 이들 중 합리적인 기준을 설정하여 선정하였다.

2. 안전개선사업 효과평가 방법

2.1. 관찰적 사전·사후 평가 방법

평가 연구 방법에는 실험연구(experimental studies)와 관찰연구(observational studies)가 있다. 실험연구는 확률적 표본설계나 실험조건의 완전한 통제가 가능한 경우에 적용한다. 외부환경조건을 통제된 상태에서 구현하여 실험한다는 것은 어려운 경우, 실제 환경에서 목적으로 하는 '조치'를 실행하여 그 변화를 관찰하는 방법이 관찰연구이다. 여기에는 사전·사후평가(before-after study)와 횡단면연구(cross-section study)가 있다. 도로 및 교통시설에 대한 정책과 개선조치가 가져오는 변화, 특히 안전성 개선에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 사전·사후의 변화에 대한 관찰연구가 바람직하다. 이는 도로 및 교통시설은 완전한 통제가 불가능한 환경이기 때문이다. 관찰적 사전·사후 평가 연구에는 다음의 세 가지 방법이 있다(Hauer, 1997).

- ① 단순비교에 의한 사전·사후 평가
(naive before-after study)
- ② 비교그룹에 의한 사전·사후 평가
(before-after study with comparison group)
- ③ 경험적 베이즈 방법에 의한 사전·사후 평가
(before-after study with empirical bayes method, EB 방법)

사전·사후 단순비교평가는 도로구간이나 교차로 등의 개체(entity)¹⁾에 시행된 안전개선조치에 대해 사전기간 사고건수와 사후기간 사고의 변화를 단순 비교하는 방법이다. 비교그룹에 의한 사전·사후 평가방법은 개선사업이 시행되지 않은 대상구간과 유사한 비교그룹(혹은 통제그룹, comparison group 혹은 control sites)을 선정하여 개선사업 전·후 사고건수의 변화를 비교하는 방법이다. 즉 비교그룹의 사전·사후 사고의 변화 비율에 의해 대상구간의 “사후 개선사업 미시행(after-period-with-no-treatment)”의 사고건수를 추정하며, 이 추정치와 사후 대상구간의 실제 사고건수의 차이가 개선효과가 된다. 비교그룹에 의한 사전·사후 평가 방법에는 비교그룹의 선정방식에 따라 일대일 대응(Yoked Comparisons)과 비교그룹(Comparison Group) 방법이 있다(Griffin과 Flowers, 1997). 전자는 하나의 개선구간에 대해서 하나의 비교구간을 선정

하는 방법이고, 후자는 하나의 개선구간에 대해 유사한 특성을 지닌 다수의 비교그룹을 선정하여 분석하는 방법이다. 각각의 분석방법은 Harwood(2002)의 연구에 구체적으로 기술하고 있다.

사고 자료는 평균으로의 회귀(RTM, regression to the mean), 사고전이(crash migration), 시간에 따른 추이(maturation), 외부우연요소(external casual factor) 등의 고유특성을 가진다(Shen 등, 2003). 평균으로의 회귀는 비무작위 표본이 모집단으로부터 선택되었을 때 발생하는 통계 현상으로써, 어떤 자료가 확률변수일 때 연속되는 자료는 이전자료의 변동추이에 영향을 받는다고보다는 결국 평균값으로 되돌아가는 현상을 나타내며, 이는 사고자료에서 일반적으로 나타나는 현상이다. 특히 개선효과의 평가에서 평균으로의 회귀 현상을 배제하거나 제대로 설명하지 못하는 경우 개선효과가 과대 추정될 수 있다. 이들 네 가지 특성은 단순비교법에 의한 사고감소 효과 평가에서 대부분 설명이 되지 못한다. 그러나 비교그룹에 의한 평가방법은 사고건수 추정에서 발생하는 외부우연요소와 시간에 따른 추이의 영향을 제거하는 효과가 있으며, 이것이 단순비교법의 결과와 비교할 때 이 방법의 장점이다. 그러나 단순비교법과 비교그룹에 의한 방법은 사고자료에 나타나는 평균으로의 회귀에 의한 편이(bias)가 극복되지 못하며 이것은 경험적 베이즈 방법에 의해서만 설명된다.

도로교통에서 개체의 안전성능에서의 변화는 교통류, 기하구조, 통행방법, 운전자 특성 등의 속성과 사고 이력자료의 두 가지 요인에 의해 영향 받는다(Hauer, 1997). 전통적인 방법인 단순평가법, 비교그룹 평가법에서 안전성능은 두 번째 요인인 사고이력자료만을 사용하여 추정 및 평가가 이루어졌다. 따라서 개체의 사고발생에 실제적으로 영향을 미치는 교통여건 및 기하구조 등의 외부요인이 배제되어 추정결과에 편이가 발생한다. 경험적 베이즈 방법의 핵심은 안전성능의 추정에 대해 위의 두 가지 요인을 모두 고려한다는 것이다. 첫 번째 요인에 대해서는 해당 개체의 속성과 유사한 속성을 가지는 대안 개체군의 안전성능을 사고예측모형의 추정을 통해 적용하는 것이다. 이를 통해 사고자료에서 나타나는 평균으로의 회귀현상을 반영하며, 개체의 관측된 사고건수가 증가 혹은 감소하는 추세에 의해 나타날 수 있는 결과의 편이를 바로 잡을 수 있다. 이 방법은 Abbess 등(1981)에 의해 제안되었으며 Hauer(1997)가 이를 논리적으로 발전시켰다. EB 방법이 대상구간에 대응하는 비교그룹을 교통량, 통행특성 및 기하구조 등에서 유사한 속성을 가진 개체군 그룹을

1) Entity(개체)는 하나의 도로구간, 교차로 한개, 개별 운전자, 버스 한대 등 도로 및 교통의 주체를 분석을 위해 구분한 개별 단위를 의미한다.

선정한다는 점에서 비교그룹에 의한 사전·사후 평가법과 같다. 그러나 비교그룹 평가법에서는 결과의 추정에서 사고이력자료만을 활용하는 반면, EB 방법에서는 비교그룹의 개체군이 가진 속성(교통량, 기하구조 등) 자료를 모형에 의해 반영한다는 점에서 비교그룹평가법과 구별된다. 이러한 의미에서 EB 방법에서 선정된 비교그룹을 ‘참조그룹(reference group)’이라 한다. 제안된 EB 방법은 이미 개선사업이 실행된 대상구간에 대해서, “사후 개선사업 미시행 시”에 몇 건의 사고가 발생하는지 알 수 없으므로, 대상구간의 이력사고자료와 유사한 통행 및 기하구조 특성을 지닌 참조그룹을 선정하여 이 그룹의 사고예측모형을 통해 대상구간의 “사후 개선사업 미시행 시”의 예측치를 추정하는 과정이다. 이러한 예측치와 대상구간의 사후 실제 사고건수를 가중평균하여 대상구간의 사후 미시행시 기대사고건수를 추정한다.

EB 방법은 단순평가법이나 비교그룹방법 보다 정확

도와 신뢰도가 높은 결과를 도출하는데, 그 원인은 현재까지 제안된 평가방법 중 유일하게 평균으로의 회귀 현상을 통제할 수 있기 때문이다. 반면 EB 방법의 단점으로는 대상구간과 참조그룹의 사고자료가 과분산되는 것을 전제로 하기 때문에 이론적으로 음이향분포만이 적용가능하다는 점이다. 이외에도 EB 방법은 여러 장·단점이 있으며, 이는 Harwood(2002)의 연구에 구체적으로 기술하고 있다.

2.2. 안전개선사업 효과평가 연구사례

교통안전개선사업 효과평가는 대부분 관찰적 사전·사후 평가법에 의하며 이에 관한 국내외의 선행연구를 검토한 결과는 표 1과 같다. 교차로, 지방부 도로, 2차로 도로, 고속도로 등에 적용 가능한 다양한 형태의 교통안전개선사업에 대한 평가 연구가 이루어졌으며, 근린주거지나 어린이보호구역 등을 공간적인 대상으로 하는 연구도 있다.

표 1. 국내외 교통안전개선사업 효과평가에 관한 선행연구

선행연구	연구목적	연구방법	연구결과
Lovell, Hauer (1986)	4개 지역 교차로 All-Way Stop Control로 전환하였을 때의 안전성 개선 효과	①비교그룹 방법 ②우도합수	4개 지역에 대한 분석에서 총사고건수가 37~62% 범위의 감소 효과를 나타냄
Kulmala (1994)	1984~1986년의 주요 교차로에 시행된 다양한 안전개선사업의 효과 평가	①사전·사후비교 ②우도합수	도로조명, 정지신호, 신호제어, 제한속도 낮춤은 사고건수 감소효과가 있음. 그러나 회전차로 추가, 직진차로 확장, 도로 확폭은 교차로 안전에 별다른 영향을 미치지 않음.
Persaud et al. (2001)	23개 교차로를 회전교차로로 전환을 경우 안전개선 효과 평가	경험적 베이지 방법	전체 사고는 40%까지 감소, 인명사고는 80% 감소, 중대사고는 90%까지 감소함
Yuan, Ivan (2001)	2차로 지방부 도로에서 교차로 접근부 선형 개량 및 좌회전차로 설치 등의 안전개선 효과와 복합적인 조치의 평가	①경험적 베이지 방법 ②우도합수 ③ANOVA 모형	전체 사고는 감소하나 사고유형별 감소 효과는 상이함. 선형개량과 좌회전차로 설치가 결합된 경우 유의한 사고감소 효과를 나타내지는 않음.
Persaud, McGee (2003)	Contemplated signal 설치에 대한 안전성 개선 효과	경험적 베이지 방법	전체사고 감소, 직각충돌사고 감소, 그러나 추돌사고는 증가함.
Harwood, Bauer (2003)	평면교차로에서 좌회전차로와 우회전차로 설치, 기존 좌회전, 우회전 차로 길이 연장 등의 안전성 개선 효과 평가	①비교그룹 방법 ②경험적 베이지 방법	지방부와 도시부의 3지와 4지 교차로 모두 좌회전차로와 우회전차로 설치로 인한 사고감소 효과가 있음.
Bauer, Harwood (2004)	도시고속도로에서 용량증대를 위해 차로수 증가 및 길어깨의 차로 전환의 안전성 효과	경험적 베이지 방법	4차로에서 5차로 전환 구간은 사고가 10~11% 증가, 5차로에서 6차로 증가 구간은 사고가 더 적게 증가
Persaud, Bahar (2004)	2차로와 4차로 고속도로에 제설용 돌출형 노면표시설치의 안전성 개선 효과 평가	①경험적 베이지 방법 ②비집계 분석	전체 사고와 야간사고, 우천시 사고의 감소효과가 있으며, 교통량이 많은 도로에서 야간사고 감소효과가 더 큼.
Persaud, Retting (2004)	2차로 지방부 도로에 정면충돌과 측면충돌사고 예방을 위해 중앙선 노면요철포장 (rumble strip) 설치의 효과 평가	경험적 베이지 방법	전체 인명사고는 14% 감소. 정면충돌과 측면충돌사고는 각각 25%와 44% 감소.
Aul, Davis (2006)	비지방 교차로에 신호기 설치에 대한 효과 평가	기호점수법, MCMC에 의한 베이지안 추정	직각충돌사고는 감소하나 추돌사고는 증가함.

(표 계속)

Sayed, El-Basyoun (2006)	근린주거지 내에 정지표지 설치의 안전성 효과 평가	①비교그룹방법 ②우도함수	사고건수가 감소하고 사고 심각도도 개선되는 효과. 즉 부상사고는 61~72% 감소, 사망사고는 45~55% 감소.
Garder, Davies (2006)	지방부 도로에 도로이탈사고 예방을 위한 길어깨 연속 노면요철포장 설치 효과 평가	우도함수	도로이탈사고의 전체 감소효과는 27%이며, 특히 줄음으로 인한 사고와 중대사고의 감소율이 높음. 그러나 악천후에는 사고감소효과가 줄어듦.
Pawlovich et al. (2006)	4차로를 3차로로 변경하는 도로다이어트 사업의 안전성 개선 효과 평가	계층포아송회귀 모형, 베이지안 추정	1마일당 사고건수 25.2% 감소, 사고율 18.8% 감소
Patel, Council(2007)	2차로 지방부 도로에서 차량단독 도로이탈사고(SVROR)를 줄이기 위한 길어깨 노면요철포장 설치 효과 평가	경험적 베이즈 방법	모든 차량단독 도로이탈사고 13% 감소, 인명피해 사고는 18% 감소
Brabander et al. (2007)	1994~2000년 사이 회전교차로 설치의 효과 평가	비교그룹 방법	회전교차로 설치로 전체 사고는 감소. 회전교차로는 무신호교차로보다 안전하나 교통약자 사고와 그 심각도는 신호교차로보다 증가함.
박민호 외(2006)	국도의 중앙분리대 설치에 따른 사고유형별·사고심각도별 사고전환효과 분석	경험적 베이즈 방법	사고유형별로는 후미추돌(직선구간), 정면충돌(전체 구간) 사고는 감소하나 후미추돌(곡선구간), 측면충돌(전체구간) 사고는 증가. 또한 사망사고는 감소하나 부상사고는 증가
임병인 외(2007)	교통사고 잦은 곳 개선사업 효과 평가 (개선사업 중 미끄럼방지포장 평가)	경험적 베이즈 방법	교차로는 사고감소율이 69%와 68%, 곡선부는 사고감소율이 29%, 22%와 90%로 나타남.
이수범 외(2008)	토지이용 특성별로 어린이 보호구역 개선 사업의 교통사고 감소효과 분석	비교그룹 방법	사고 10여건 감소(사고 감소율 약 39%). 토지이용별로는 주거, 아파트, 주상복합지역이 각각 2.41건, 3.8건, 0.5건 감소효과를 나타냄.

3. 경험적 베이즈 방법에 의한 고속도로 안전 진단사업 효과평가

3.1. 경험적 베이즈 방법에 의한 효과평가 방법

고속도로에 대해 분석기간에 연구 대상노선의 기대사건수 κ 를 추정하고자 할 때, 가용한 두 가지 정보가 있다. : 첫째 교통류 및 기하구조, 통행특성 등의 속성에서 대상노선과 유사한 참조그룹은 평균 $E\{\kappa\}$ 와 분산 $VAR\{\kappa\}$ 인 κ 을 가진다. 둘째 주어진 분석기간에서 대상노선은 K 건의 사고를 기록한다. EB 방법을 통해 이들 두 정보가 결합되어 대상노선의 κ 에 대해서 기대사건수와 분산인 $E\{\kappa|K\}$ 와 $VarE\{\kappa|K\}$ 가 추정된다. 즉 $E\{\kappa|K\}$ 는 참조그룹의 $E\{\kappa\}$ 와 대상노선의 K 의 두 요소에 대해서 다음과 같이 결합된다. 이때 K 와 κ 의 분석기간은 같다.

$$E\{\kappa|K\} = \alpha E\{\kappa\} + (1-\alpha)K \quad (1)$$

$E\{\kappa|K\}$: K 건의 이력사고에 대한 기대사건수 κ 의 추정치

$E\{\kappa\}$: 참조그룹의 사고예측모형에 의한 기대치 κ

K : 개선사업 시행 시 대상노선의 실측 사고건수

α : 가중치($0 < \alpha < 1$)

여기서, α 는 두 요소의 결합을 위한 가중치이며, 0과 1 사이의 값을 가진다. 가중치 α 는 참조그룹에서의 κ 의 평균과 분산에 의한 값으로써 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{VAR\{\kappa\}}{E\{\kappa\}}} \quad (2)$$

또한 $E\{\kappa|K\}$ 의 분산은 다음과 같이 결정된다.

$$VarE\{\kappa|K\} = (1-\alpha)E\{\kappa|K\} \quad (3)$$

Hauer(2002)는 $E\{\kappa\}$ 가 음이항분포에 의한 추정치인 경우, 도출되는 과분산 파라메타(over-dispersion parameter, ϕ)를 적용하여 가중치 α 에 대해 다음 식을 제안하였다.

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{E\{\kappa\}}{\phi}} \quad (4)$$

식 (1)에 의해 대상노선의 “사후 개선사업 미시행 시”의 기대사건수 $E\{\kappa|K\}$ 가 추정되면 이 값을 활용하여 개선효과를 평가한다. 개선효과는 개선 후 실측 사고건수 K 와 기대사건수 $E\{\kappa|K\}$ 의 비로 정의하며 이를 안전효과지수(safety effectiveness factor)라 한다.

구간 i 에 대한 안전효과지수를 $\hat{\theta}_i$ 라 하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\hat{\theta}_i = \frac{K_i}{E\{\kappa|K\}_i} \quad (5)$$

사전·사후 평가 연구 설계에서 고려할 조건은 첫째 사전·사후 분석기간이 같아야 하며 둘째 사전·사후 기간의 교통량이 대략적으로 같아야 하고, 마지막으로 분석 기간 동안 대상구간의 교통환경이 변하지 말아야 한다 (Shen, 2003). 분석에서 이러한 조건에 맞지 않을 경우 보정을 하여야 한다. 본 연구에서는 $E\{\kappa|K\}_i$ 에 대해 교통량 변화와 분석기간의 차이에 대한 보정을 하였으며 사전·사후의 교통량 차이에 대한 보정계수 Adj_i 와 분석 기간에 대한 보정계수 Adj_d 는 다음 식과 같다.

$$Adj_i = \frac{f(AADT_A)}{f(AADT_B)} \quad (6)$$

$$Adj_d = \frac{YEARS_A}{YEARS_B} \quad (7)$$

Adj_i 는 각 구간에 대해 일교통량을 변수로 한 음이항 분포모형에 의해 추정된 사전(Before, B)과 사후(After, A) 기대사고건수의 비며 Adj_d 는 사전과 사후 기간의 비다. 구간별 기대사고건수 $E\{\kappa|K\}_i$ 에 이들 보정 계수를 적용한 사후 개선사업 미시행 시 기대사고건수 $\hat{\pi}_i$ 는 다음 식과 같다.

$$\hat{\pi}_i = E\{\kappa|K\}_i \cdot Adj_i \cdot Adj_d \quad (8)$$

개선 후 실측 사고건수 K_i 을 $\hat{\lambda}_i$ 로 정의하면, 식 (5)의 안전효과지수 $\hat{\theta}_i$ 는 다음 식으로 정의된다.

$$\hat{\theta}_i = \frac{\hat{\lambda}_i}{\hat{\pi}_i} \quad (9)$$

구간 i 의 사고건수 증감율 E_i 는 다음과 같다.

$$E_i = 100(\hat{\theta}_i - 1) \quad (10)$$

식 (9)에서 $\hat{\theta}_i < 1$ 이면 개선사업이 효과가 있는 것이며, 반대로 $\hat{\theta}_i > 1$ 이면 개선사업이 사고감소 효과에 영향을 주지 못하는 것으로 해석한다. 또한 식 (10)에서 E_i 는 음의 값이면 개선사업 후 그만큼의 사고건수 감소율을

나타내며 반대로 양의 값이면 그만큼의 비율로 사고가 증가함을 나타낸다.

구간 i 에 대한 전체구간의 안전효과지수 $\hat{\theta}$ 는 다음과 같다. 여기서, $\hat{\lambda} = \sum \hat{\lambda}_i$, $\hat{\pi} = \sum \hat{\pi}_i$ 으로써 각 개별구간 i 의 합이다.

$$\hat{\theta} = \frac{\frac{\hat{\lambda}}{\hat{\pi}}}{1 + \frac{VAR\{\hat{\pi}\}}{\hat{\pi}^2}} \quad (11)$$

$\hat{\lambda}$ 와 $\hat{\pi}$, $\hat{\theta}$ 의 분산은 다음 식과 같다.

$$VAR\{\hat{\lambda}\} = \sum \hat{\lambda}_i \quad (12)$$

$$VAR\{\hat{\pi}\} = \sum VAR E\{\kappa|K\}_i \cdot Adj_i^2 \cdot Adj_d^2 \quad (13)$$

$$VAR\{\hat{\theta}\} \cong \hat{\theta}^2 \frac{\left[\left(\frac{VAR\{\hat{\lambda}\}}{\hat{\lambda}^2} \right) + \frac{VAR\{\hat{\pi}\}}{\hat{\pi}^2} \right]}{\left[1 + \frac{VAR\{\hat{\pi}\}}{\hat{\pi}^2} \right]^2} \quad (14)$$

전체구간의 사고건수 증감율 E 는 다음과 같다.

$$E = 100(\hat{\theta} - 1) \quad (15)$$

3.2. 영동고속도로 안전진단사업의 효과평가

3.2.1. 효과평가의 절차

위의 3.1절에서 기술한 경험적 베이스 방법을 적용하여 공용중인 고속도로 안전진단사업에 대한 효과평가를 수행하고자 하며 그 절차는 그림 1과 같다. 대상노선은 2005년과 2006년에 사업이 시행된 영동고속도로를 대상으로 하였으며, 분석기간은 사업기간을 전·후로 각 1~3년씩으로 하였다. 또한 2005년과 2006년에 시행된 조치에 대해 전·후 분석기간이 다르므로 앞의 식(7)에 의거해 '단계 3'에서 이에 대한 보정도 수행하였다. 참조그룹은 이 기간 동안에 안전진단사업이 시행되지 않은 노선 중에 영동고속도로의 노선특성을 분석하고 유사성을 검토하여 선정하였다. 유사성의 기준으로는 교통류 특성과 기하구조 특성 등을 고려하였다. 구체적으로 교통류를 대표하는 특성으로써 일교통량과 V/C 등을 검토하였고, 기하구조를 대표하는 특성으로는 차로 수와 IC/JCT간 구간길이 등을 검토하였다.

단계 1	대상사업 선정 대상노선 및 참조그룹 선정 대상노선과 참조그룹의 자료구축 - 구간별 사고건수, 일교통량 및 기하구조 자료
단계 2	참조그룹의 사고예측모형 추정
단계 3	EB방법에 적용 : - $E(\kappa)$, α , $E\{\kappa K\}$, $VarE\{\kappa K\}$ 산정 - 일교통량과 분석기간의 차이 보정
단계 4	구간 i 에 대한 효과평가 : - $\hat{\pi}_i$, $\hat{\lambda}_i$, $\hat{\theta}_i$, E_i 산정
단계 5	전체구간의 효과평가 : - $\hat{\pi}$, $\hat{\lambda}$, $VAR\{\hat{\lambda}\}$, $VAR\{\hat{\pi}\}$, $\hat{\theta}$, E 산정

그림 1. 경험적 베이지 방법에 의한 효과평가 절차

3.2.2. 영동고속도로 안전진단사업의 개요

영동고속도로는 인천에서 강릉까지 우리나라의 동서를 가로지르는 주요 축으로써, 총 234.6km 중 수도권과 지방부 구간이 각각 절반 수준으로 4~8차로까지의 차로 구성을 갖고 이에 따른 교통류 특성이 다양한 노선이다. 안전진단사업은 2004년에 계획되어 2005년부터 전체구간에 걸쳐 시행되었다. 주요 노선인 경부나 서해안, 중부 등은 구간별로 시기가 분할되어 시행되거나 그 외의 노선은 사업이 이루어진 전체 연장이 충분하지 않거나 노선특성이 제한적이었다. 이러한 이유로 영동고

표 2. 영동고속도로 구간별 안전진단 조치결과

IC/JCT명	연장 (km)	안전진단 조치결과(내용 및 건수)	
		2005년	2006년
서창JCT-월곶IC	5.4	안전(1), 포장(2)	-
서안산C-안산C	3.3	안전(1), 표지(1)	-
안산JCT-군포IC	6.4	안전(1)	-
부곡IC-북수원C	2.8	안전(1)	-
북수원IC-동수원IC	6.1	안전(5), 표지(1)	-
용인IC-양지C	8.0	운전자(1)	-
이천C-여주JCT	8.7	-	안전(4), 포장(1)
여주JCT-여주IC	6.2	-	포장(1)
여주IC-문막IC	20.0	-	포장(6), 운전자(1)
문막IC-만종JCT	9.1	포장(2)	-
만종JCT-원주IC	6.6	안전(1)	-
원주IC-새말IC	12.7	안전(2)	-
새말IC-둔내IC	17.1	안전(2), 표지(2), 속도(1), 기하구조(2)	-
둔내IC-면원IC	17.0	안전(1)	표지(1)
횡계C-강릉JCT	22.6	표지(1)	표지(2)
소 계		28개 (64%)	16개 (36%)

속도로를 효과분석을 위한 노선으로 선정하였다. 영동고속도로의 2005년과 2006년 본선에 시행된 안전진단 조치결과는 표 2와 같다.

개선항목은 조치내용에 따라 속도, 기하구조, 안전시설, 표지 및 가변정보표지판, 운전자조건, 포장, 기상조건 및 환경으로 분류하며 이중 안전시설 개선이 19개로 가장 많고, 포장이 12개, 표지 및 가변정보표지판이 8개 등의 개선이 이루어졌다.

3.2.3. 참조그룹의 선정

경험적 베이지 방법에서 참조그룹은 대상노선의 "사후 개선사업 미시행 시"의 예측치 추정을 위해 사고예측모형을 제공해주는 역할을 한다. 참조그룹의 규모는 대상노선과 비교해서 2~3배 수준이 적정하며, 개선사업 전·후 2~3년간 발생한 사고자료를 사용하는데, 이는 전·후 분석기간이 길어질 경우 그 기간 동안 외부환경의 변화가 포함될 수 있기 때문이다. 또한 일반적으로 개선사업의 공사기간은 분석에 포함하지 않는다(Shen, 2003). 본 연구에서 사전·사후 분석기간은 각 2년으로 하였으며, 사업이 시행된 2005년은 분석에서 제외하였다. 이에 따라 사전기간은 2003년과 2004년이고 사후기간은 2006년과 2007년이며, 일부 2006년에 시행된 사업에 대해서는 사전기간 2003~2005년이고 사후기간은 2007년이다. 또한 사전·사후 분석기간의 차이에 대해서는 식(7)에 의해 보정을 하였다.

영동고속도로는 총 234.5km로써 우리나라 동서 지역을 연결하는 주요노선이다. 참조그룹은 2007년까지 안전진단사업이 시행되지 않은 노선이나 구간 중 영동고속도로와 유사한 특성을 가지는 노선으로 선정하였으며 그 결과는 표 3과 같다. 참조그룹의 총연장은

표 3. 참조그룹 선정(2007년 기준)

노선명 / 구간 / 연장	제외구간
1) 경부, 구세C~옥천C, 기흥IC~양재C 약 292km	옥천C~기흥IC 14개 구간 (2005년 시행)
2) 서해안, 군산~금천 구간 약 195km	목포IC~군산C 11개 구간 (2005년 시행)
3) 경인 23.9km	-
4) 제2경인 26.7km	-
5) 서울외곽순환고속도로, 판교~퇴계원, 판교~일산 91.7km	-
6) 호남 194.2km	-
7) 호남지선 54km	-
8) 중부내륙, 김천~여주 약 151.2km	내서JCT~현풍JCT 6개 구간 (2007년 시행)
총 1,028.7km	-

1,028.7km로써 영동고속도로 234.5km와 비교해 충분한 수준으로 표본수가 확보되었다.

표 3에서 참조그룹 노선의 안전진단사업 미시행 구간 중 영동고속도로와 구간 및 교통류 특성이 유사하도록 일교통량은 18,000~160,000대/일, 구간길이는 23.0km 미만, 차로수는 4, 6, 8 차로인 구간을 선정하였다. 이에 따라 총 589개의 데이터가 도출되었으며 그 결과는 표 4와 같다.

표 4. 참조그룹 사고예측모형 데이터집계(2003~2007년)

구분	노선명	표본수	구간수 (연간)	사고 건수	구간길이 (km)	차로	AADT (대/일)
미시행 / 참조 그룹	영동	150	30	147	0.6~22.6	4,6,8	18,546~157,912
	경부	138	27~28	253	1.7~17.8	4,6,8	29,500~153,092
	서해안	108	23	88	1.2~19.7	4,6	18,006~154,617
	경인	25	7	13	2.2~4.9	6,8	50,946~155,445
	제2경인	40	8	11	2.1~4.5	6,8	61,124~148,557
	서울외곽	80	25	64	1.0~9.2	8	82,917~159,537
	호남	115	22~25	144	1.4~16.8	4	20,469~67,004
	호남지선	30	6	32	3.7~22.5	4	21,602~49,423
	중부내륙	53	7~11	66	3.5~23.0	4	18,715~45,126
	계	589	6~28	671	1.0~23.0	4,6,8	18,006~159,537

3.2.4. 참조그룹 사고예측모형의 구축

고속도로 도로안전진단사업의 효과평가를 위해 식(1)의 경험적 베이지 관계식에 적용하기 위해, 참조그룹의 사고예측모형이 필요하다. 이러한 사고예측모형은 사고 발생에 영향을 미치거나 혹은 일정한 영향관계가 있을 것으로 예상되는 일련의 공변량(covariates)과 반응변수인 사고와의 관계에 대해 특정한 통계모형을 적용한 추정을 통해 개발된다. 일반적인 사고예측모형의 형태는 다음과 같다.

$$E(\kappa) = f(x, \beta) \quad (16)$$

여기서, $E(\kappa)$: 단위시간당 구간별 기대사고건수

$x: x_1, x_2, \dots, x_p$, 사고발생에 영향을 미치는

일련의 공변량

$\beta: \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$, 추정계수

이 관계식을 통해 사고와 사고발생에 영향을 미치는 속성과의 관계를 나타내는 함수가 만들어지며, 계수의 추정은 주로 일반화 선형모형(generalized linear models, GLM)²⁾에 의한다. 교통사고는 통계적으로 독립적인 확률사건이므로 포아송분포나 음이항분포가 적합하다. 그러나 식(1)의 경험적 베이지 관계식에서 가중치 α 는 과분산 파라메타에 의해 산정되며, 이는 모형에 적용되는 사고자료가 과분산되는 특성을 나타내야 한다. 즉 경험적 베이지 관계식은 음이항분포로 적용이 제한된다는 단점을 가진다.

참조그룹의 사고예측모형은 궁극적으로 대상노선인 영동고속도로의 예측치 추정에 적용되므로 설명변수는 예측 가능하거나 고정적인 값이어야 한다. 이에 따라 예측 가능한 요인으로써 교통류 특성과 고정적인 요인으로써 기하구조 특성에 한정하여 변수를 선정하였다. 이러한 교통류 및 기하구조 특성은 도로유형 및 기능에 따라 달라지므로 선행연구에서는 이를 노드와 링크로 구분하여 사고예측모형을 개발하였다(Lord, 2000 ; 2004). 본 연구는 고속도로 구간(link)을 대상으로 하므로 간선도로 구간 모형을 적용하며, 이에 대한 함수의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$E(\kappa) = \alpha_0 L^{\beta_1} F_L^{\beta_2} e^{\sum_{p=3}^p x_p \beta_p} \quad (17)$$

여기서, F_L 은 양방향 구간교통량, L 은 구간길이, X_p 는 기하구조 특성을 나타내는 일련의 설명변수이고 $\alpha_0, \beta_1, \beta_2, \beta_p$ 는 추정된 회귀계수이다. 또한 $E(\kappa)$ 는 각 구간에 대한 사고 예측치 즉, 기대사고건수이다. 교통량 변수 F_L 과 구간길이 L 은 각각 power 함수를 적용하였다.

고속도로는 IC/JCT 단위로 교통량 및 기하구조 등의 자료가 집계되므로 본 연구에서는 IC/JCT 단위로 사고 자료를 집계하여 분석하였다. 따라서 식 (17)에서 종속

2) GLM(Generalized Linear Model, 일반화된 선형모형)은 반응변수의 확률분포가 지수형태(exponential form)의 분포를 따르는 경우를 통틀어 나타내며 전통적 선형모형을 확장한 개념이다. 여기에 포함되는 확률분포는 Normal, Inverse Gaussian, Gamma, Geometric, Negative binomial, Poisson, Binomial, Multinomial 분포가 있다. 모집단의 평균이 비선형인 경우 연결함수(link function)를 통해 선형 예측치(linear predictor)로 변환되어 공식화되어 추정되도록 하는 것이 특징이다(Cameron, 1998).

변수는 IC/JCT 구간 단위로 발생하는 연간 사고건수이다. 또한 설명변수도 IC/JCT 구간 단위로 집계 가능한 교통류 및 기하구조 특성 요인으로 한다. 이에 따라 교통류 특성으로써 일교통량과 버스화물차의 중차량 비율을 고속도로 본선 구간의 기하구조 특성으로는 IC/JCT간 구간길이, IC/JCT 구간내 곡선구간수, IC/JCT 구간내 유출입 연결로수를 변수로 적용하였다.

교통류 특성을 나타내는 변수로써 일교통량 외에 버스와 화물차의 비율을 고려하였다. IC/JCT 구간별 연평균 일교통량은 고속도로 본선의 교통류 특성을 대표하는 속성으로써 일교통량이 많아질수록 사고발생이 증가하는 정(+)의 상관관계에 있다. 또한 고속도로는 지역간 통행이 주목적이므로 버스나 화물차 등의 중차량 비율이 높고 중차량의 혼입이 교통류에 미치는 영향이 상당하므로 이것이 사고발생에 유의한 영향을 미칠 것으로 보고 이를 모형의 설명변수로 적용하였다.

표 5. 사고예측모형의 설명변수

구분	변수명
교통류 특성	일교통량(AADT), 버스비율, 화물차비율
기하구조 특성	IC/JCT간 구간길이, IC/JCT 구간내 곡선구간수, IC/JCT 구간내 유출입 연결로수

본 연구의 모형은 IC/JCT 구간별로 자료가 집계되어 사고가 예측되므로 기하구조 특성도 IC/JCT 구간별로 집계된 자료형태이어야 한다. 이런 경우 하나의 구간 내에 여러 개의 종단경사와 평면곡선이 존재할 수 있고, 구간이 짧고 단순한 구조인 경우 직선부만으로 구성될 수도 있다. 따라서 IC/JCT 구간별로 기하구조 특성을 나타낼 경우 선형이나 경사도, 유출입 연결로 등을 구간별로 특징지어 변수로 적용할 수 있는 방법을 고려하여야 한다. 이에 따라 본선의 기하구조 특성을 나타내는 변수로써 IC/JCT간 구간길이, IC/JCT 구간내 곡선구간수, IC/JCT 구간내 유출입 연결로수를 적용하였다. 첫째 IC/JCT간 구간길이는 IC/JCT의 설치간격을 의미하므로 기하구조에 의한 교통류 변화를 나타내는 특성이 될 수 있다. 즉 IC/JCT 간격이 짧은 경우 유출입 연결로가 빈번하므로 교통류 변화가 많아지고 그에 따른 사고위험도 커진다. 반면 IC/JCT 간격이 긴 경우 유출입로가 줄어들어 교통류 변화는 적어지나 선형이 단조롭거나 반대로 선형조건이 여러번 변할 수 있으므로 이에 따라 사고위험이 달라질 수 있다. 이러한 IC/JCT 간격에 따른 교통류 및 기하구조의 다양한 변화 가능성과 사고발생의 관계에 대해 특정한 함수관계를 고려할 수 있다.

무엇보다도 IC/JCT간 구간길이가 길어지면 해당 구간에 포함되는 사고발생건수도 많아지기 때문에, 이러한 구간길이와 사고건수 분포에 대해 특정한 함수관계가 성립한다. 이러한 이유로 인해 국외의 많은 고속도로 사고예측모형 연구에서 구간길이를 변수로 적용하고 있다 (Hauer, 2004 ; Lord, 2000, 2004 ; Chatterjee, 2005 ; Parajuli, 2006). 고속도로 조사통계에서 IC는 '본선에서 영업소로 빠져나가는 출구 노즈부', JCT는 '본선에서 접속하는 다른 고속도로로 빠져나가는 출구 노즈부'를 기준으로 IC/JCT간 구간길이를 산정하고 있다. 둘째 IC/JCT 구간에서 평면선형의 영향을 변수로 적용할 수 있는 방법으로써 구간 내에 곡선부가 얼마나 존재하는가를 기준으로 하였다. 이러한 IC/JCT 구간내 곡선구간수는 운전자가 주행 중에 곡선부로 인지할 수 있을 것으로 판단되는 구간의 수를 IC/JCT 구간별로 집계하였으며 0~7개까지로 집계되었다. 셋째 고속도로 본선에 접속하는 모든 진출입로는 교통류에 변화를 줄 수 있는 기하구조 요인이다. 즉 짧은 구간에 진출입 연결로가 많으면 교통류 변화가 심하고, 진출입 연결로가 적은 경우 교통류에 영향이 적어진다. 이에 따라 IC/JCT 구간내 유출입 연결로수를 교통류 변화와 이에 따른 사고발생에 영향을 미치는 요인으로 선정하였다. 본선에 접속되는 연결로는 IC나 JCT에서의 진출입로 외에 휴게소, 비상차로, 버스정류장 등으로의 연결로도 있으며 이를 모두 포함하여 개수를 산정하였으며 0~14개까지로 집계되었다. 선정된 설명변수를 식(17)에 반영한 모형의 기본식은 다음과 같다.

$$E(\kappa) = \mu_i = \alpha_0 L_i^{\beta_1} F_{Li}^{\beta_2} e^{(\beta_3 X_{1Li} + \beta_4 X_{2Li} + \beta_5 X_{3Li} + \beta_6 X_{4Li})} \quad (18)$$

여기서, i 는 개별 IC/JCT 구간이고 F_{Li} 은 IC/JCT 구간별 일교통량(AADT), L_i 는 IC/JCT간 구간길이, X_{1Li} 는 버스비율, X_{2Li} 는 화물차비율, X_{3Li} 는 IC/JCT 구간내 곡선구간수, X_{4Li} 는 IC/JCT 구간내 유출입 연결로수이며, $\alpha_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ 는 추정된 회귀계수이다.

기대사고건수 $E(\kappa)$ 의 확률구조는 음이항분포를 적용하며 이때 선형 예측치(linear predictor, η_i) 추정을 위한 연결함수(link function)는 로그이므로 위의 식(18)은 다음과 같이 전개된다.

$$\eta_i = \ln(\mu_i) = \ln(\alpha_0) + \beta_1 \ln(L_i) + \beta_2 \ln(F_{Li}) + \beta_3 X_{1Li} + \beta_4 X_{2Li} + \beta_5 X_{3Li} + \beta_6 X_{4Li} \quad (19)$$

위 식의 모형 추정결과 도출된 η_i 는 $\hat{\mu}_i = \exp(\hat{\eta}_i)$ 의 관계에 의해 기대사고건수 $\hat{\mu}_i$ 가 산정된다.

모형의 추정은 최우추정법(maximum likelihood estimates)에 의하며, SAS STATS에서 GENMOD 프 로시저를 활용하여 추정하였다.

3.2.5. 참조그룹 사고예측모형의 추정

앞의 식(18), 식(19)에 대한 음이항분포모형의 추정 결과는 표 6과 같다. 모형 구축단계에서 정의한 6개의 설명변수 중에 IC/JCT간 구간길이, 일교통량, IC/JCT 구간 내 곡선구간수가 유의한 변수로 추정되었다. 나머지 버스비율, 화물차비율, IC/JCT 구간 내 유출입 연결 로수는 5% 유의수준에서 계수가 유의하지 않은 것으로 나타나 모형 추정결과에서 제외하였다. 또한 과분산 파라메타는 0.151이고 표준오차가 0.062로 추정되어 유 의한 수준이므로 참조그룹의 데이터에 대해 음이항분포 의 적용이 적합하다고 할 수 있다.

표 6. 참조그룹의 사고예측모형 추정결과(η_i)

추정결과			
변수	추정치	표준오차	Pr>ChiSq
상수 ($\ln(\alpha_0)$)	-7.648	1.035	<.0001
구간길이 ($\ln L_i, \beta_1$)	0.981	0.099	<.0001
일교통량 ($\ln F_{Li}, \beta_2$)	0.513	0.084	<.0001
곡선구간수 (X_{1Li}, β_3)	0.085	0.030	0.005
과분산 파라메타 (ϕ)	0.151	0.062	-
모형통계			
	DF*	Value	Value/DF
Deviance	585	641.539	1.097
Pearson Chi-square (X^2)	585	583.558	0.998
Log Likelihood	-	-470.360	-

*DF: Degree of Freedom

이러한 파라메타 추정결과를 식(19)에 적용하여 기 대사고건수 $\hat{\mu}_i$ 를 산정하며 이는 식(1)의 경험적 베이 즈 관계식에서 $E(\kappa)$ 에 해당한다. 또한 과분산 파라메 타 ϕ 는 식(4)에 적용되어 가중치 α 를 산정하는데 적 용된다.

일반화선형모형의 적합도를 나타내는 통계로는 Deviance와 Pearson Chi-Square(X^2)가 있다. Deviance는 실측치(y)와 회귀계수 예측치(μ)의 각 최 대우도값(maximum log likelihood)의 차에 두 배로 정의되며 식(20)과 같다. 모형 간의 비교에서는 이 값이 작을수록 추정이 더 잘 된 것으로 해석한다.

$$D(y, \mu) = 2\{L(y) - L(\hat{\mu})\} \quad (20)$$

또 다른 우도값 통계인 Pearson Chi-Square는 다 음 식과 같이 정의된다.

$$Pearson - X^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - \hat{\mu}_i)^2}{VAR(y_i)} \quad (21)$$

평균과 분산이 적절하다면, $E[\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{\mu}_i)^2 / VAR(y_i)] = n$ (n 은 표본수)의 관계가 성립한다(Cameron and Trivedi, 1998). 이는 $Pearson - X^2$ 이 n 에 근사한 값 이어야 모형이 적합함을 의미한다. 이에 따라 표 6에서 보듯이 두 통계치의 Value/DF가 1에 근사하므로 모형을 음이항분포로 추정한 것이 적합하다고 할 수 있다.

3.2.6. 경험적 베이즈 방법에 의한 효과평가

경험적 베이즈 방법에 의한 영동고속도로 구간별 안 전진단 조치에 대한 평가결과는 표 7과 같다.

영동고속도로는 IC 23개, JCT 7개의 30개 구간으로 구성되어 있다. 대부분의 분기점 간격이 일정하므로, 이를 기준으로 30개 구간을 5개의 분기점 단위구간으 로 구분하였다. 이에 따라 개별 IC 구간별로 효과분석 을 하였고 이를 다시 분기점 단위로 묶어 개선효과를 산출하였다. 그러나 표 7에서 보듯이 전체 30개 구간중 15개 구간에서만 개선조치가 이루어졌고, 나머지 구간 은 개선사업이 시행되지 않아 실제 분석은 개선사업이 시행된 15개 구간을 대상으로 하였다. 식(18)에 의해 $E(\kappa)$ 가 산정되고, 식(1)에 의해 $E(\kappa|K)$ 가 산정된다. 또 한 식(2)부터 식(15)까지의 관계식을 통해 표 7의 나머 지 결과 값이 산정된다. 즉 $\hat{\lambda}_i$ 은 사후 실측 사고건수이 고 $\hat{\pi}_i$ 는 사후 개선사업 미시행 가정시의 예측 사고건수 로써 식(8)에 의해 산정된다. 각 IC/JCT 구간별 안전효 과지수 $\hat{\theta}_i$ 는 식(9)에 의해 산정되며, 이는 미시행 가정 시 사고 1건당 사후(시행후) 사고발생건수를 의미한다. 또한 E_i 는 사후 사고건수 증감율이며 식(10)에 의해 산 정된다. 마지막으로 $\hat{\theta}$ 와 E 는 분기점 구간별 안전효과 지수와 사고건수 증감율이며 식(11), 식(15)에 의해 산 정된다.

각 개별 구간의 개선효과를 살펴보면, 서창JCT~안산 JCT, 안산JCT~신갈JCT의 모든 구간이 $\hat{\lambda}_i < \hat{\pi}_i$ 으로써 사업시행 후 사고발생이 더 적으므로 개선사업의 효과 가 있는 것으로 나타났다. 가령 서창JCT~월곶IC의 경 우 사후 미시행 시 0.29건의 사고가 발생하는 것으로 예측되었으나 실제로 사고가 한건도 발생하지 않아

표 7. 경험적 베이즈 방법에 의한 효과평가 결과

분기점 구간	구간	연도	$E\{\kappa\}$	$E\{\kappa K\}$	$\hat{\lambda}_i$ (시행 시)	$\hat{\pi}_i$ (미시행 시)	$\hat{\theta}_i$ (효과지수)	E_i (증감율)	$\hat{\theta}$	E
서창JCT~안산JCT	서창JCT~월곶IC	2006~2007	2.24	0.27	0	0.29	0.00	-100	0.00	-100
	서안산IC~안산IC	2006~2007	1.45	0.25	0	0.27	0.00	-100		
안산JCT~신갈JCT	안산JCT~군포IC	2006~2007	2.91	2.99	3	3.34	0.90	-10	0.84	-16
	부곡IC~북수원IC	2006~2007	1.17	0.24	0	0.25	0.00	-100		
	북수원IC~동수원IC	2006~2007	3.05	2.09	2	2.20	0.91	-9		
신갈JCT~여주JCT	용인IC~양지IC	2006~2007	2.63	1.17	1	1.25	0.80	-20	0.58	-42
	이천IC~여주JCT	2007	1.69	0.14	0	0.15	0.00	-100		
여주JCT~만종JCT	여주JCT~여주IC	2007	0.91	0.99	1	0.93	1.08	8	0.98	-2
	여주IC~문막IC	2007	3.40	2.06	2	2.03	0.98	-2		
	문막IC~만종JCT	2006~2007	2.36	2.04	2	1.94	1.03	3		
만종JCT~강릉JCT	만종JCT~원주IC	2006~2007	1.45	2.73	3	2.62	1.14	14	1.04	4
	원주IC~새말IC	2006~2007	3.07	2.10	2	1.97	1.01	1		
	새말IC~둔내IC	2006~2007	5.44	0.29	0	0.28	0.00	-100		
	둔내IC~면온IC	2006~2007	3.19	3.02	3	2.78	1.08	8		
	횡계IC~강릉JCT	2006~2007	7.01	3.16	3	2.84	1.06	6		

100%(E_i)의 사고감소율을 나타낸다. 이렇듯 모든 구간에서 사후 사고 발생이 감소한 것에 대해 분기점 구간별로는 서창JCT~안산JCT, 안산JCT~신갈JCT, 신갈JCT~여주JCT의 안전효과지수 $\hat{\theta}$ 는 0.0, 0.84, 0.58 이고 이에 의한 사고감소율은 100%, 16%, 42%로써 개선사업의 효과가 있는 것으로 판단할 수 있다.

그러나 여주JCT~만종JCT, 만종JCT~강릉JCT는 $\hat{\theta}$ 가 0.98, 1.04로써 개선사업 전·후에 사고발생 차이가 크지 않은 것으로 나타나고 있다. 구체적으로 살펴보면 여주IC~문막IC와 새말IC~둔내IC를 제외한 나머지 모든 구간에서 $\hat{\lambda}_i > \hat{\pi}_i$ 으로써 사업시행 후 사고발생이 더 크게 나타나 개선사업의 효과가 없는 것으로 판단할 수 있다. 특히 만종JCT~원주IC의 경우 사업시행 후에도 3건의 사고가 발생하며 $\hat{\theta}_i=1.14$ 로써 14%의 사고증가율을 나타내고 있다. 결과적으로 대부분의 구간이 개선사업의 효과가 있는 것으로 나타나고 있으나 일부 구간에서는 효과가 없거나 미미한 것으로 나타나고 있어 이를 실제 개선조치 내용과 비교하여 검토할 필요가 있다.

이에 따라 각 구간별 개선효과를 개선조치 내용과 비교하면 표 8과 같다. 표에서는 구간별로 이루어진 개선조치 내용 및 km당 개선조치 건수(구간별 길이가 다르기 때문)를 사고증감율(E_i)과 비교하였다. 표에서 보듯이 대체적으로 km당 개선조치가 많은 경우 사고감소율이 높으며, 여러 개선조치가 이루어진 구간은 대부분 사고감소율이 높게 나타나고 있다. 가령 서창JCT~월곶IC, 서안산IC~안산IC, 새말IC~둔내IC, 북수원IC~동

수원IC, 이천IC~여주JCT, 새말IC~둔내IC가 이러한 경우에 해당한다. 반대로 km당 개선조치가 적거나 단일 개선조치가 이루어진 구간의 경우 사고감소의 효과가 없는 것으로 나타나고 있다. 이에 해당하는 구간은 여주JCT~여주IC, 만종JCT~원주IC, 둔내IC~면온IC, 횡계IC~강릉JCT 등이다. 따라서 일부 예외적인 구간도 있으나 다수의 개선조치가 시행되는 경우에 더 높은 개선효과를 기대할 수 있는 것으로 결론지을 수 있다.

표 8. 영동고속도로 구간별 안전진단 조치결과

IC/JCT명	개선 조치 (개/km)	안전진단 조치결과 (2005~2006년) (내용 및 건수)	사고 증감율 (E_i)
서창JCT-월곶IC	0.56	안전(1), 포장(2)	-100
서안산IC-안산IC	0.61	안전(1), 표지(1)	-100
안산JCT-군포IC	0.16	안전(1)	-10
부곡IC-북수원IC	0.36	안전(1)	-100
북수원IC-동수원IC	0.98	안전(5), 표지(1)	-9
용인IC-양지IC	0.13	운전자(1)	-20
이천IC-여주JCT	0.57	안전(4), 포장(1)	-100
여주JCT-여주IC	0.16	포장(1)	8
여주IC-문막IC	0.35	포장(6), 운전자(1)	-2
문막IC-만종JCT	0.22	포장(2)	3
만종JCT-원주IC	0.15	안전(1)	14
원주IC-새말IC	0.16	안전(2)	1
새말IC-둔내IC	0.41	안전(2), 표지(2), 속도(1),기하구조(2)	-100
둔내IC-면온IC	0.12	안전(1), 표지(1)	8
횡계IC-강릉JCT	0.13	표지(3)	6

표 8의 결과에서 개선 후에도 사고가 오히려 증가하는 구간이 분명하게 나타나므로, 사고분석 및 개선사업 담당자는 이러한 구간들을 선별하여 별도의 조사 및 원인분석과 대응조치를 수립하도록 제안할 수 있다.

지금까지의 분석결과에서 나타난 수치적 효과가 개선 사업에 의한 것인지에 대해 의구심을 가질 수 있다. 이에 대해 본 분석에서 적용한 경험적 베イズ 방법이 가지는 장점을 들어 설명할 수 있다. 전술한 관찰적 사전·사후 평가방법 중 단순비교나 비교그룹에 의한 평가에서는 전·후 사고추이에서 사고가 지속적으로 감소한다든지 혹은 지속적으로 증가하는 등의 특정한 현상이 평가 결과에 반영될 수 있다. 그러나 경험적 베イズ 방법에서는 사고모형을 적용하여 대상구간의 평균 기댓값과 비교하므로 특정한 시·공간에서 나타날 수 있는 사고 추이의 편이가 배제되어 분석결과를 개선사업에 의한 영향으로 해석할 수 있다.

4. 결론

도로교통안전진단은 도로의 계획 및 설계단계에서부터 교통사고가 발생할 수 있는 요소를 찾아내 미리 개선하고 건설 후 운영단계에도 도로구조나 안전시설 등이 사고방지에 적절한지를 평가하는 예방적 차원의 안전성 강화 제도이다. 우리나라에서는 90년대 후반에서 2000년대 초에 도입에 대한 논의가 있었으며, 시범사업 및 공용중인 고속도로안전진단사업이 꾸준히 진행되어 오다가, 2008년에 개정된 교통안전법에 시행을 체계화·의무화하는 조항이 신설되었다. 공용중인 고속도로안전진단의 경우 2003년에 시작되어 매년 2~3개 노선에 대해 꾸준히 시행되어 왔고 2011년까지 20개 노선 2,676km에 사업이 시행되어 가용한 대부분의 노선에 대해 사업이 완료되었다. 따라서 본 연구에서는 그동안 일관성 있게 추진되어 온 공용중인 고속도로안전진단 사업을 대상으로 효과평가를 수행하였다. 초창기에 안전진단이 시행된 노선 중 한 개 노선을 선정하여 효과평가를 수행하였으며 영동고속도를 대상으로 하였다. 평가방법은 관찰적 사전·사후 평가방법 중 경험적 베イズ 방법에 의한다. 효과평가결과 사업이 시행된 대부분의 구간에서 개선효과가 있는 것으로 나타났으나 일부 구간에서는 효과가 없거나 미미한 것으로 나타났다. 이를 각 구간의 개선조치 내용과 비교하여 검토한 결과 개선 조치의 수와 항목에 비례하여 개선효과가 나타나고 있었다. 즉 해당구간에 여러 개선조치가 시행된 경우 양호

한 효과가 나타났으며, 효과가 나타나지 않는 구간은 개선조치가 적거나 단일한 경우가 일반적이었다.

결론적으로 본 연구를 통해 한 노선에 시행된 안전진단사업 전반에 대한 대략적이면서도 핵심적인 평가결과를 도출할 수 있게 된다. 다음 단계에서는 이러한 결과를 바탕으로 각 구간별로 구체적인 분석과 대응책 마련이 가능할 것이다. 특히 개선사업 후에도 효과가 나타나지 않고 오히려 사고발생이 증가하는 구간이 드러나므로 이들에 대한 구체적인 조사 및 원인분석 등 미시적인 수준의 연구와 적극적인 대응책 마련이 가능하게 된다. 안전진단사업에 대해 특정한 한 개 노선에 대한 평가결과로 볼 때 개선효과가 나타나지 않는 구간도 있으나 전반적으로는 개선효과가 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 향후 안전진단사업, 특히 공용중인 도로에서의 사업을 논할 때, 효과가 나타나는 부분에 대해서는 긍정적으로 받아들이고, 효과가 나타나지 않는 부분에 대해서는 사업내용을 조정하는 등의 방향 수정이 필요하다. 또한 한번 진단사업이 시행된 노선의 경우 향후 재시행 시 주기와 사업내용, 방향설정 등에서 효과평가 결과를 참고로 할 수 있다는 점에서 본 연구가 의미를 갖는다.

참고 문헌

- 박민호 외, 「중앙분리대 설치에 따른 사고전환효과 분석」, *대한교통학회지*, 제24권 제2호, pp.113-124, 2006
- 이수범, 정도영, 김도경, 「토지이용 특성별 어린이보호구역 개선사업의 교통사고 감소효과 분석」, *대한교통학회지*, 제26권 제3호, pp.109-117, 2008
- 임병인 외, 「Empirical Bayes Method를 이용한 개선기술 효과 분석에 관한 연구」, *대한토목학회 정기학술대회*, 2007
- Abbess, C. and Wright, C.C., 「Accident at blackspots : estimating the effectiveness of remedial treatment, with special reference to the regression-to-the-mean effect」, *Traffic Engineering and Control* 22(10), pp.535-542, 1981
- Aul, N. and Davis, G., 「Use of Propensity Score Matching Method and Hybrid Bayesian Method to Estimate Crash Modification Factors of Signal Installation」, *Transportation Research Record* 1950, pp.17-23, 2006
- Bauer, K., et al., 「Safety Effect of Narrow Lanes and Shoulder-Use Lanes to Increase Capacity of Urban Freeways」, *Transportation Research Record* 1897, pp.71-80, 2004
- Brabander, B. and Vereeck, L., 「Safety Effect of roundabouts in Flanders : Signal type, speed limits and vulnerable road users」, *Accident Analysis and Prevention* 39, pp.591-599, 2007

- Cameron, A. C. and Trivedi. P. K., 『Regression Analysis of Count Data』, Cambridge University Press, 1998
- Chatterjee, A., et al., 『Planning Level Regression Models for Crash Prediction on Interchange and Non- Interchange Segments of Urban Freeways』, *Center for Transportation Research*, The University of Tennessee, Knoxville, TN, 2005
- Garder, P. and Davies, M., 『Safety Effect of Continuous Shoulder Rumble Strips on Rural Interstates in Maine』, *Transportation Research Record 1953*, pp.156-162, 2006
- Griffin, L. I. and Flowers, R. J., 『A Discussion of Six Procedures for Evaluating Highway Safety Projects』, *Federal Highway Administration*, Publication, U. S. Department of Transportation, 1997
- Harwood, D., et al., 『Safety Effectiveness of Intersection Left- and Right-Turn Lanes』, *Report FHWA-RD-02-089. Federal Highway Administration*, Publication, U. S. Department of Transportation, 2002
- Harwood, D., et al., 『Safety Effectiveness of Intersection Left- and Right-Turn Lanes』, *Transportation Research Record 1840*, pp.131-139, 2003
- Hauer, E., 『Observational Before-After Studies in Road Safety』, Pergamon. Oxford, UK, 1997
- Hauer, E., 『Statistical Road Safety Modeling』, *Transportation Research Record 1897*, pp.81-87, 2004
- Kulmala, R., 『Measuring the Safety Effect of Road Measures at Junctions』, *Accident Analysis and Prevention 26*, pp.781-794, 1994
- Lord, D., 『The Prediction of Accidents on Digital Networks: Characteristics and Issues Related to the Application of Accident Prediction Models』, Ph. D Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, 2000
- Lord, D. and Persaud, B., 『Estimating the Safety Performance of Urban Road Transportation Networks』, *Accident Analysis and Prevention 36*, pp.609-620, 2004
- Lovell, J. and Hauer, E., 『The Safety Effect of Conversion to All-Way Stop Control』, *Transportation Research Record 1068*, pp.103-107, 1986
- Parajuli, B., et al., 『Safety performance assessment of interchanges, ramps, and ramp terminals』, *Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, 2006
- Patel, R., Council, F. and Griffith, M., 『Estimating Safety Benefits of Shoulder Rumble Strips on Two-Lane Rural Highways in Minnesota』, *Transportation Research Record 2019*, pp.205-211, 2007
- Pawlovich, M., et al., 『Iowa's Experience with Road Diet Measures』, *Transportation Research Record 1953*, pp.163-171, 2006
- Persaud, B., et al., 『Observational Before-After Study of the Safety Effect of U.S. Roundabout Conversions Using the Empirical Bayes Method』, *Transportation Research Record 1751*, pp.1-8, 2001
- Persaud, B., et al., 『Development of a Procedure for Estimating Expected Safety Effects of a Contemplated Traffic Signal Installation』, *Transportation Research Record 1840*, pp.96-103, 2003
- Persaud, B., Retting, R. and Lyon, C., 『Crash reduction following installation of centerline rumble strips on rural two-lane roads』, *Accident Analysis and Prevention 36*, pp.1073-1079, 2004
- Persaud, B., et al., 『Safety Evaluation of Permanent Raised Snow-Plowable Pavement Markers』, *Transportation Research Record 1897*, pp.148-155, 2004
- 『SAS 9.2 GENMOD Procedure Manual』
- Sayed, T. and El-Basyouny, K., 『Safety Evaluation of Stop Sign In-Fill Program』, *Transportation Research Record 1953*, pp.201-210, 2006
- Shen, J. and Gan, A., 『Development of Crash Reduction Factors-Methods, Problems, and Research Needs』, *Transportation Research Record 1840*, pp.50-56, 2003
- Yuan, F., et al., 『Safety Benefits of Intersection Approach Realignment on Rural Two-Lane Highways』, *Transportation Research Record 1758*, pp.21-29, 2001

(접수일 : 2012. 1. 6 / 심사일 : 2012. 1. 10 / 심사완료일 : 2012. 3. 20)