

건널목 개선사업 효과의 계량적 평가 방법의 적용

Localization Effort of Rail Grade Crossing Impact Analysis with GradeDec2000

조성훈*
Cho, Sung-hoon

서선덕**
Suh, Sunduck

권경숙***
Kwon, Kyung-Sook

ABSTRACT

Rail crossings are major accident-prone areas. Higher traffic volume, frequent rail operation, increased train speed all contribute to increased accident rate and severity. In Korea efforts are being made to upgrade currently at-grade rail crossings to grade crossings. There is, however, no quantified analysis measures to analyse the impact of rail grade crossing, thus make it difficult to prioritize different projects under the budget constraints. Projects are selected based on the negotiation between Korea National Railway(KNR) and local governments. To shed light on the development effort for Korean procedure, GradeDec 2000 program of Federal Railroad Administration(FRA) was applied for Korean context. Case study involving three rail crossing was carried out, and results are analyzed. Research efforts which need further attention are identified, research direction is analyzed considering local procedure, and issues in the application of the procedures are discussed in detail.

I. 서 론

우리나라의 현재 건널목은 1종이 1,651개소, 2종이 21개소, 3종이 104개소가 존재한다. 건널목은 철도사고의 주원인이며, 이러한 철길 건널목 사고는 인명 피해가 큰 비참한 대형 사고이다. 1999년 한해만도 95건의 건널목 사고가 일어났는데, 이것은 전체 철도 사고의 16.5%이고, 운전사고중의 94%에 해당한다. 이 뿐만 아니라 건널목이 입체화되어 있지 않은 경우 도로를 사용하는 차량들의 지체가 발생함으로써 통행시간이 지체되고, 이로 인하여 많은 사회적 비용이 손실되고 있다. 이에 최근 들어서 건널목을 입체화하려는 노력들이 많이 일어나고 있으며, 건널목 개량 촉진법에서는 철도 또는 도로를 신설하거나 노선을 개량하는 경우에 철도와 도로가 교차하게 되는 부분은 입체 교차화 하여야 한다고 명시하고 있다. 하지만, 도로는 지방 자치단체 또는 도로공사에서 관리하고 있고, 철도는 철도청에서 관리하고 있기 때문에 서로의 이해관계가 잘 맞지 않을 경우 건널목 입체화 사업이 쉽게 이루어지지 않는다. 또한 이러한 건널목 입체화로 인한 편익이 주로 도로에서의 편익에 국한되고 있는 실정이며, 명시적으로 효과를 개량화하지 못하고 있기 때문에 건널목 입체화에 대한 우선순위를 산정하기 어려운 실정이다.

앞으로 철도가 점점 고속화 되고, 안전이 강조되는 상황에서 건널목의 입체화는 반드시 필요하

며, 한정된 재원으로 효율적인 투자가 이루어지기 위해서는 건널목 입체화에 대한 계량적 평가 도구가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 미국 연방 철도청(FRA)에서 개발한 GradeDec 2000을 이용하여 도로에 대한 편익뿐만 아니라, 철도에 대한 영향도 고려할 수 있는 객관적인 평가도구의 한국에의 적용 가능성을 타진하여 보았고, 안전 및 환경, 그리고, 통행시간의 절감과 같은 편익 산출 결과에 대해서 우리나라 고유의 평가도구를 개발하는데 이론적 자료 사용의 기초를 제공하고자 한다.

II. 건널목 개선의 효과

건널목 개선을 통해 얻을 수 있는 효과는 도로부문과 철도부문에 나눌 수 있다. 도로부문의 효과에는 안전성 향상과 사고비용의 감소, 통행시간 비용의 감소, 환경 오염 감소, 통행시간의 향상과 그로 인한 시스템의 신뢰성 향상, 차량 운행비용 감소와 네트워크 개선 편익이 있다. 철도부문의 효과는 철도의 운행 지장을 막을 수 있고, 사고 시 복구비용 감소, 그리고 건널목의 입체화를 통해 안내원의 비용과 같은 유지 관리비용의 절약을 얻을 수 있다. 그 외에 사회적인 간접 편익으로는 지역분리를 완화시킴으로서 지역개발 효과와 지역 산업구조 개편, 시장권의 확대등이 있다. 좀더 구체적으로는 건널목을 입체화 함으로써 사고를 방지할 수 있고, 열차 통과로 인한 차량의 지체가 없어지고, 네트워크가 개선되는 편익이 발생한다. 이로 인해 통행시간이 감소하며, 전체적인 교통 시스템의 신뢰성이 향상되고, 지체시간동안 발생하던 환경 오염이 줄어들게 된다.

1. 우리나라의 현황

우리나라의 경우 건널목이 위치하는 지자체와 철도청의 합의에 의해 건널목을 계량화한다. 이에 따라서, 구체적인 건널목 개선 효과를 계량화하는 연구가 아직까지는 이루어지지 않았으나 현재 대한교통학회와 한국철도학회에서 공동으로 개발중에 있는 철도투자 분석편람에서는 포함하고 있다. 만약 현재 계량화를 시도한다면 교통시설투자편람(KOTI, 2001)이나 철도부문사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(KDI, 2000)를 참고하여 분석해야 한다. 하지만, 위의 내용들은 도로부문의 편익만을 고려하고 있다. 그 내용들을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 차량운행비 절감 편익

차량운행비용은 주행속도와 교통량을 이용하여 주행속도에 따른 차량운행비 원단위를 적용하여 산출한다. 즉, 차종별 교통량과 길이를 곱한 결과를 평균 속도에 기초한 차종별 차량운행비 원단위와 곱하여 차량운행비를 산출한다. 그리고 사업 미시행시와 사업 시행시의 비교된 차액을 운행비용의 절감편익으로 산출한다.

(2) 통행시간 절감 편익

통행자의 통행시간 절감에 따른 편익 산출은 사업 미시행시와 사업 시행시에 대해 수단별로 산

* 한양대학교 석사과정, 비회원 ** 한양대학교 교수, 정회원 *** 한양대학교 석사과정, 비회원

출된 총통행시간을 각기 다른 시간가치를 적용하여 총통행시간 비용을 산출한 후 비교된 차액을 통행시간 절감 편익으로 산출한다.

(3) 교통사고 감소 편익

현실적인 제약상 객관적인 손실의 항목은 교통사고로 인하여 발생하는 사망 및 부상으로 한정하며, 일억 차량-km당 교통사고 사상자를 추정하여 사고유형별 사고비용과 도로 유형별 일억 차량-km를 곱하여 교통사고를 추정하고 산출하여 사업시행과 사업 미시행의 차이로 교통사고 감소 편익을 산출한다.

(4) 문제점 및 개선방향

지금까지 설명한 우리나라의 편익 산출방법은 현재 도로에서 적용되고 있는 것들로서, 건널목 개선에 따른 편익의 크기는 객관적으로 알 수 없다. 다시 말하면, 철도의 사고로 인한 운행지장, 복구 비용, 건널목의 유지관리비의 편익과 같은 것들을 분석하지 못함으로써 신뢰도가 떨어지므로, 많은 연구를 통한 개선이 필요하다. 그래서, 본 논문에서는 우선 외국의 사례, 특히 미국 연방 철도청(FRA)의 투자결정 보조도구인 RailDec의 한요소인 건널목구성으로써 개발한 GradeDec 2000을 이용하여 우리나라의 사례에 적용해 보고, 편익의 계량화에 대한 기초자료를 제공하고자 하였다.

GradeDec 2000은 건널목 투자에서 우선순위 결정을 위한 비용-편익분석을 수행한다. 특히, 철도의 특성을 포함하여 사고 감소 편익과 환경 비용 절감 등 모든 편익을 고려함으로써 교통체계의 사용자와 사회에 발생하는 광범위한 범위의 편익을 계량화하여 나타낸다. 이 프로그램의 특징은 교통측과 건널목 자료를 입력하면 미국 교통부(USDOT)의 사고예측과 심각도 모형을 통해 각각의 건널목에 대하여 교통사고에 따른 사망 및 부상자 수뿐만 아니라 재산피해까지 추정할 수 있다. 또한 위험도 분석(Risk Analysis)을 통해 장래의 각 항목에 대한 불확실성을 고려할 수 있다.

2. GradeDec 2000의 모형

(1) 차량운행비 절감 편익

GradeDec2000은 도로-철도 건널목에서 개선되는 결과를 가지고 차량운행비용 절감을 계산한다. 절감치는 건널목 개선 후 줄어드는 지체로 계산한다. 이 때 발생하는 지체의 감소로 인하여 차량의 연료 소비는 감소된다. 차량의 연료 소비는 연료 소비율에 지체시간을 곱하여 계산되며, 차량 운영비용의 개선편익은 아래와 같이 추정된다.

$$FCOST_{Ftype, year} = FCOST_{Ftype, year-1} \cdot \frac{1 + fping_{year}}{1 + cping_{year}}$$

$$FCIC_{Ftype} = FCI_{Ftype} \cdot FCOST_{Ftype}$$

$$FCIC = \sum_{Ftype} FCIC_{Ftype} \cdot AF$$

$$VOCB = FCIC_{Base} - FCIC_{Alt}$$

여기서, $FCOST_{Ftype,year}$ = 예측년도의 고정된 연료가격(달러)

$fpirg_{year}$ = 연료가격의 성장율

$cpirg_{year}$ = 가격상승율

$FCIC_{Ftype}$ = 연료종류에 따른 가격

FCI_{Ftype} = GCX에서 하루당 평균 불필요한 연료의 소모량

AF = 연 보정계수

$VOCB$ = 차량운영비용의 개선편의

(2) 통행시간 절감 편의

GradeDec은 도로-철도 건설목에서 차량에 의해 발생하는 지체변화에 근거하여 통행시간 편의를 계산한다. 건설목 지체는 열차의 통과로 인해서 건설목에서 기다리는 시간당 차량 수로 나타낸다. 열차의 통과로 인해 지체 시간은 열차의 길이와 속도로 계산된다. 통행시간 절감 편의는 다음과 같이 계산된다.

$$PVDC = PVD \cdot avgocc \cdot votpx$$

$$TDC = TD \cdot vottr$$

$$DCA = (PVDC + TDC) \cdot AF$$

$$TTSB = DCA_{Base} - DCA_{Alt}$$

여기서, $PVDC$ = 일평균승용차지체시간비용, 달러

PVD = 일평균승용차지체, 대-시간

$avgocc$ = 평균승용차점유율, 승객/대

$votpx$ = 승객의 시간가치, 달러/시간

TDC = 일평균트럭지체시간비용, 달러

TD = 일평균트럭지체, 대-시간

$vottr$ = 트럭의 시간가치, 달러/시간

DCA = 연간지체비용, 달러

AF = 연 보정계수

$TTSB$ = 연통행시간 절감편의, 달러

(3) 교통사고 감소 편의

사고율 계산은 도로, 철도시설, 각 수단별 교통량과 각 수단에 대한 일일 교통수단 분담율의 특성에 따라 시행한다. 사고율은 기준년도의 1억차량당 사고발생건수를 기준으로 사망, 부상, 재산피해로 나눈다. 사고율의 계산은 철도와 도로의 교통량분포(TOD)의 얼마나 일치하는지를 측정한 TOD 노출계수를 적용한다. 예를 들어 철도와 도로가 같은 TOD를 가지고 있다면 이때 계수는 1

이 된다. 또한 철도통행이 6시간동안 발생하고 도로통행이 24시간동안 일정하다면 노출계수는 0.25이다. 장래 사고 수의 예측은 교통부(DOT) 사고예측과 심각도 모델로부터 계산한다. 그 식은 다음과 같다.

$$EI_{year} = aadt_{by} \cdot 365 \cdot [(1 + aadtg)^{year} \cdot (1 + tvrg)^{year}]^{\beta}$$

$$AC_{i,year} = \frac{AR_{i,by} \cdot EI_{year}}{100,000,000}$$

여기서, i = 사고의 심각도 : 사망, 부상, PDO(재산피해)
 year = 순차적인 예측년도의 수
 EI_{year} = 예측년도의 노출 효과
 aadt_{by} = 기준년도 연평균일교통량
 aadt_{rg} = AADT의 연평균성장률
 tv_{rg} = 열차통행량의 연평균성장률
 β = 노출성장률과 관계되는 사고탄력성
 AR_{i,by} = 기준년도의 사고율 (1억 차량당 사고건수)
 AC_{i,year} = 예측년도의 사고건수

건널목 개선을 통한 사고 감소 편익은 기본대안의 사고에서 개선후의 사고의 차이를 통하여 산출한다.

(4) 환경 개선의 편익

Gradedec2000은 건널목에서 도로차량이 정차하는 시간이 감소함으로써 발생하는 차량 배기 오염물질의 절감을 계산한다.

일산화탄소, 탄화수소, 질소산화물에 대해서 자동차와 트럭, 버스에 대한 배출 비율표가 있다. 모형은 건널목에서 정지한 차량으로부터 방출되는 오염물질의 양을 계산한다. 도로차량에 대한 배출비용은 건널목에서의 각 차종별, 경과시간을 적절한 배출 비율을 곱하여 계산하며, 차종에 따른 일평균 배출량을 통하여 환경 개선편익을 아래와 같은 식으로 산출한다.

$$EB = \sum_{Etype} [(EM_{Base, Etype} - EM_{Alt, Etype}) \cdot VOE_{Etype}] \cdot AF$$

여기서, Etype = 배출물질 종류 - 탄화수소, 일산화탄소, 질소산화물
 EM_{Base, Etype} = 기본케이스에서의 차종별 배출물질, 톤
 EM_{Alt, Etype} = 대안케이스에서의 차종별 배출물질, 톤
 VOE_{Etype} = 배출물질로 인한 비용, 달러/톤
 AF = 연 보정계수
 EB = 환경 개선편익, 달러

(5) 기타 편익

그 외의 편익으로 네트워크 개선 편익과 지역적 편익이 있다. 네트워크 편익은 인접한 도로망에서의 지체 감소로 인한 편익을 계산하는 것으로서, 인접한 도로부분과 주요 교차로에서 생기는 평균대기행렬길이에 따라 편익이 발생한다. 즉, 개선전에 지체로 인하여 대기행렬이 발생하였다가 건널목의 개선으로 인해 대기행렬이 소멸됨으로써 얻어지는 네트워크 전체에 대한 편익을 산출한 것이다. 만약, 건널목 신호등이 도로신호등과 연동되어지면, 건널목으로부터의 네트워크 지체는 50% 감소한다.

지역적 편익은 접근성의 향상, 편하고 안전한 건널목으로 개선에 따른 이동성의 향상, 줄어든 소음등 국소적 편익을 모두 고려하여 산출한 것이다.

(6) 비용

비용은 변경대안에서 발생하는 자본비용, 연간 운영 및 유지비용, 그리고, 감가 상각비로 구성된다. 이 중에서 가장 크게 차지하는 것은 자본비용이다. 이러한 비용을 GradeDec에서 나타내는 건널목 형태별 값을 표현하고 있다.

3. GradeDec 적용을 위한 고려사항

GradeDec 2000을 이용하기 위해서는 많은 자료의 준비가 필요하며, 우리나라의 경우에 대해서는 현실적으로 구득이 불가능한 자료도 많다. 본 논문에서는 자료수집의 한계로 인하여 모든 자료를 준비하지 못하였다. 중요 변수중에서 본 논문에서는 사례연구 대상지역에 대한 과거 5년 동안의 사고자료, 건널목과 교차하는 도로의 차로수 및 연평균일일교통량(AADT), 트럭 및 버스 비율, 건널목 형태, 초기 자본비용, 열차의 속도와 철로수, 도로와 철도의 일중교통량분포(TOD)분포를 고려하였다.

그 외 고려하지 못한 중요한 변수로는 철도/도로의 장·단기 성장률에 대한 확률분포, 승용차와 버스의 재차인원, 화차/객차의 평균길이와 비율에 대한 확률 분포, 통행시간에 따른 AADT 탄력성, 인플레이션 가격, 사회적 할인율, 사고의 종류에 따른 비용 및 사회비용, 통행시간 비용, 배기 가스 소모 비용, 연료 및 Oil 비용등이 있다. 이렇게 고려하지 못한 내용은 공통적으로 들어가는 자료로서 GradeDec 2000에서 제공하는 Default 값을 사용하였다. 결과에서 이러한 값은 제외하고 고려하였다. 물론, 모든 변수를 고려하여야 좋은 결과를 얻을 수 있지만, 앞에서 언급한 자료만으로도 투자의 우선순위를 정하고, 계량화된 편익을 일차적으로 산출하는데는 큰 문제가 없었다.

III. 사례연구

1. 대상지역 선정 / 입력자료 구성

건널목의 효과를 분석하고, 투자 우선순위를 결정하기 위하여 경춘선에서 최근 5년간 사고가 많

은 건널목 중 도시부/지방부 여부, 다양한 차로수, 교통량 상태에 따른 건널목 개선 효과를 분석할 수 있는 3개소의 건널목을 선정하였다.

<표4-1> 대상지역 현황

	갈매입시건널목	내동 건널목	은의 건널목
위 치	화랑대-퇴계원(도시부)	마석-대성리(지방부)	남춘천-춘천(지방부)
차 로 수	4 차로	2 차로	6 차로
5년간 사고건수	2 건	2 건	2 건
현재 건널목 형태	1종(안내원 있음)	1종 (안내원 없음)	1종 (안내원 있음)
개선후 건널목 형태	입체교차	입체교차	입체교차
도로교통량(AADT)	20,000대/일	3,000대/일	30,000대/일
개선비용(억원)	37.5	19.5	49.5
교차로와의 거리(m)	200	1000	50

<표 4-2> TOD 분포

			12AM-6AM	6AM-12PM	12PM-6PM	6PM-12AM
철 도			0.1	0.3	0.3	0.3
도로	승용차/트럭	은의/갈매	0.1	0.4	0.2	0.3
		내동	0.1	0.4	0.4	0.1
	버 스		0.1	0.3	0.3	0.3

표<4-1>과 <4-2>에서 현재의 건널목 형태가 모두 1종이지만, 안내원이 있는 경우도 있고, 없는 경우가 있다. 그러나 GradeDec 2000에서는 차단기와 신호등이 있는지를 판단하기 때문에 현재 모두 같은 형태의 건널목으로 분석하였고, 개선후의 형태도 모두 입체건널목으로 가정하였다. 건널목 개선비용은 GradeDec에서 제공하는 값을 사용하였으며, 4차로와 6차로 도로의 경우는 추가적으로 개선비용이 필요할 것으로 고려하였다. 그리고, 도로상의 일통행분포(TOD) 분포를 살펴보면 철도의 경우에는 경춘선에 모두 속해 있으므로, 같은 분포를 사용하였고, 도로의 경우에는 버스는 주어진 배차간격이 있으므로 균일한 분포를 사용하였지만, 승용차와 트럭은 도심부와 지방부의 특성을 고려하여 분석하였다. 즉, 나머지 상황은 고정된 상태에서 AADT와 차로수, 그리고 투자비용을 중심으로 편익/비용 분석을 하여, 투자의 우선순위를 산정하고, 각 건널목의 편익을 계량해 보았다. 그리고, 편익을 분석하는데 많은 영향을 미치는 변수는 건널목과 주요 교차로와의 거리인데, 이것은 안전개선편익, 지체의 감소로 인한 환경개선편익, 차량운행비용 감소편익에 아주 민감하게 작용한다. 따라서, 은의 건널목의 교차로와의 거리를 500m로 하였을 때는 편익들이 어떻게 변하는지도 알아보고자 한다.

* 한양대학교 석사과정, 비회원 ** 한양대학교 교수, 정회원 *** 한양대학교 석사과정, 비회원

2. 적용결과

<표4-3> 편익 및 비용 산출결과

단위 : 억원

	갈매임시건널목	내동 건널목	은의 건널목(50m)	은의 건널목(500m)
안전에 대한 편익	29.28	25.31	33.62	26.58
통행시간에 대한 편익	22.50	3.18	38.08	38.1
환경에 대한 편익	0.09	0.01	0.15	0.01
차량운행비용 편익	0.94	0.13	0.15	0.15
총 편익	52.81	28.63	72	64.84
총 비용	30.12	16.47	41.04	41.04
편익/비용 비	1.75	1.74	1.79	1.58

표 <4-3>을 보면 총 편익은 은의 건널목이 가장 크게 나타났고, 내동 건널목이 가장 작게 나왔음을 알 수 있다. 그 이유는 은의 건널목은 6차로의 도로로서 교통량이 많기 때문에 건널목의 입체화로 인해 많은 통행시간의 절약 발생하였고, 내동 건널목의 경우 교통량이 적기 때문에 그만큼 작은 편익이 발생하였다. 하지만 은의 건널목의 경우, 교차로와의 거리를 500m라고 가정한 경우, 통행시간에 대한 편익을 제외하고는 모두 갈매 임시 건널목에서 더 많은 편익이 발생함을 알 수 있다. 이러한 차이가 나는 이유는 건널목과 교차로사이의 거리가 멀면, 열차가 통과할 때 지체하게 되는 차량이 교차로까지 영향을 미치지 않기 때문이다. 위의 결과를 가지고 투자 우선순위를 정한다면 편익/비용 비 항목에서 알 수 있듯이, 은의 건널목이 교차로와의 거리가 멀다고 가정했을 때는 갈매 임시건널목이 가장 높고, 은의 건널목이 가장 낮고, 은의 건널목과 교차로의 거리가 가까울 때는 은의 건널목이 가장 많은 편익이 발생하고 내동 건널목이 가장 작은 편익이 발생함을 알 수 있다. 물론 이 결과가 그대로 우리에게 적용이 가능한 것은 아니다. 하지만, 적어도 갈매와 은의 건널목의 경우에서 보는 것처럼, 개선의 상대적인 우월성을 객관적으로 따질 수 있는 한 척도는 분명히 제공함을 알 수 있다. 사용되는 변수의 값이 얼마나 신빙성이 있는가가 바로 결과의 신빙성에 직결이 됨은 말할 나위가 없을 것이다.

IV. 요약 및 추후 연구과제

본 연구에서 건널목의 입체화를 통해 얻을 수 있는 편익과 투자우선순위를 GradeDec 2000 프로그램을 이용하여 산출해 보았다. 비록 완벽한 자료를 이용한 것은 아니었지만, 적용결과 도로측면만을 고려한 편익이 아닌 철도측면까지 고려한 사고감소 편익, 통행시간 절감 편익, 환경에 대한 편익, 차량 운행비용에 대한 다양한 편익을 구할 수 있었으며, 3개소의 건널목에 대하여 편익을 비교함으로써, 개선 사업시 우선순위를 알아볼 수 있는 가능성을 파악할 수 있었다. 추가적인 현지화 노력이 있으면, 이러한 도구를 훨씬 객관적으로 만들 수 있을 것이다.

향후 연구에서는 본 연구에서 다루지 못했던 위험도 분석에 사용하는 여러 확률분포에 대한 자료수집 방법과 네트워크 편익, 지역적 편익등과 같이 우리나라에서 아직까지 계량화되지 않은 편익들에 대한 현지화(Localization) 연구가 더 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 한국과학기술부, 한국과학재단에서 지원한 첨단도로연구센터의 연구수행결과입니다.

참고문헌

1. 철도부문사업의 예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 연구(개정판), 한국개발연구원, 2001
2. 도로사업 투자분석 기법정립(최종보고서), 국토연구원, 1999.12
3. 교통사업 투자분석지침, 교통개발연구원, 2001
4. GradeDec 2000 Model Documentation, FRA

* 한양대학교 석사과정, 비회원 ** 한양대학교 교수, 정회원 *** 한양대학교 석사과정, 비회원