

고속도로 생애주기비용(Life Cycle Cost) 산정을 위한 사용자비용 모형



김태완



임용택



길홍배

1. 서론

고속도로와 같은 사회간접자본 시설 등은 대규모의 투자 사업으로 단기에 많은 초기 비용이 투입되는 반면 투자에 대한 효과는 장기간에 걸쳐 상대적으로 적게 발생하는 특성이 있다. 따라서 이때까지는 사업의 타당성을 평가하거나 예산집행의 효율성을 측정하는 척도로 주로 초기투자비의 크기가 사용되었으며 장기적인 경제성 분석에 대한 결과는 분석의 신뢰성과 체계 등이 미흡하여 의사결정 과정에 크게 관여하지 못하였다. 그러나 최근에는 도로사업에서 전체생애를 고려하여 비용을 추정하는 생애주기비용(Life Cycle Cost, LCC)분석이 적극 도입되어 적용되고 있다. 시설물의 생애주기비용이란 시설물의 생애주기 동안에 발생하는 모든 비용의 합을 지칭하며, 크게 건설비, 유지관리비와 같이 구조물의 소유주가 직접적으로 지불하는 관리자비용(Agency cost)과 구조물의 유지관리 시 도로 이용자들이 지불하는 혼잡비용인 사용자비용(User cost)으로 구분된다.

관련연구에 따르면(한국도로공사, 2001) 교량 LCC분석의 경우, 교량형식과 유지관리수준에 따라 전체 생애주기비용 중 사용자 비용이 최소 10%에서 최대 60%까지 차지하는 것으로 나타나, 사용자 비용이 LCC분석의

김태완 : 중앙대학교 도시공학과, twkim@cau.ac.kr, 직장전화:031-670-4845, 직장팩스:031-675-3971
 임용택 : 전남대학교 교통물류학부, limyt@yosu.ac.kr, 직장전화:061-659-3341, 직장팩스:061-659-3349
 길홍배 : 한국도로공사 도로교통기술원, hgil@freeway.co.kr, 직장전화:031-371-3330, 직장팩스:031-371-3339

주요 비용 항목임을 알 수 있다. 따라서 합리적인 LCC분석을 위해서는 반드시 사용자 비용을 포함하여 LCC분석을 수행할 필요가 있다. 사용자 비용에는 유지관리에 따른 차량의 지정체로 인한 시간, 운행비용의 증가, 환경비용, 교통사고 비용 등이 포함되므로 정확한 사용자 비용의 산정을 위해서는 차량의 지정체를 정확하게 분석할 수 있는 모형이 필요하다. 본 고에서는 먼저 LCC의 개념 및 기법, LCC분석에 활용되는 사용자비용 산정모형들의 기본 개념 및 분석방법들을 비교 설명하고 그 한계점과 앞으로의 개선방안에 대하여 살펴보고자 한다.

II. LCC 분석의 개념

1. 생애주기비용(LCC)의 정의

시설물의 생애주기(Life Cycle : LC)란 시설물의 생산에서 철거에 이르는 전 과정을 나타내는 용어로 일반적으로 계획단계(Planning), 설계단계(Design), 입찰 및 계약단계(Bidding & Contract), 시공계획단계(Pre-Construction), 운영단계(Running), 인도단계(Commissioning), 시공단계(Construction), 폐기처분단계(Demolition) 등 모든 단계를 포함한다. 시설물의 생애주기비용(Life Cycle Cost : LCC)은 시설물의 생애주기 동안에 발생하는 모든 비용의 합을 지칭하며, 즉 생애주기 비용은 신설도로의 건설비용이나 기존 도로의 현 단계에서의 유지관리(보수·보강·교체) 비용과 같은 초기비용, 향후 유지관리를 위한 기대유지 관리비용과 유지관리 행위동안 도로가 제 기능을 발휘하지 못함으로써 발생할 수 있는 기대손실비용(인명손실비용, 도로사용자비용, 간접적 지역손실비용) 등 모든 범위의 비용을 포함한다.

2. LCC 분석기법분류

LCC 분석기법은 단지 경제적인 요소에 근거하기 때문에 최종 의사결정에는 안전성(Safety), 신뢰성(Reliability), 운영성(Operability)과 환경요인 등

의 비경제적인 요소를 고려할 필요가 있으며 이러한 비용, 환경 및 경영적 요소가 가미되어 LCCA, LCCP, LCCM의 개념으로 분류하여 발전되고 있다.

• **LCCA(Life Cycle Cost Analysis)**

분석대상과 물리적 성능 및 특징이 유사한 시설물로부터 수집된 건설 및 유지에 관한 실적자료를 이용하여 계획시설물의 생애비용을 추정하는 방법으로 분석목적에 적합하도록 데이터의 보정이 필요함

• **LCCP(Life Cycle Cost Planning)**

설계과정에서 설계도면으로 표현되는 설계정보를 이용하여 총 비용을 산정하는 방법으로 견적전문가의 의견자료에 근거하여 비용을 예측하므로 정확한 비용예측이 가능하도록 다양한 자료의 수집과 처리 등을 위한 일관성 있는 접근방법이 필요함

• **LCCM(Life Cycle Cost Management)**

현재 공용중인 시설물과 부속물에 대한 최적관리비용을 산정하는 방법으로 LCCA에서 산정된 유지관리비용을 토대로 시설물 또는 부속물의 용도를 변경함으로써 유지관리비용을 감소할 수 있는 방안을 도출함

3. 고속도로 LCC 비용항목의 구성

고속도로 건설에서의 비용항목은 설계비 및 공사비로 구성되는 초기투자비, 생애주기동안 발생하는 유지관리비, 사용자 비용과 시설물의 해체/처분비로 구성되며 기본 및 실시설계완료 단계까지 투입되는 비용은 보통 전체 사업비의 3% 정도로 전체 LCC에서 차지하는 비중이 매우 적으며 비용의 대부분은 공사비와 사용자비용이다.

Ⅲ. 사용자비용 모형

1. 사용자비용의 정의

고속도로 점용공사로 인한 사용자비용은 도로의 시공, 보수·보강, 재시

공 등을 위하여 도로가 제 기능을 발휘하지 못하는 상황 즉 교통통제로 인한 차량운행의 지·정체 및 우회 등에 따른 도로이용자에게 추가로 부담되는 비용이다. 일반적으로 말하는 도로사용자비용은 실질적인 자원비용의 변화를 발생시키는 직접효과만을 포함하고 있으며 도로사용자 비용은 크게 시간지연비용(도로이용자 및 화물의 시간손실에 대한 비용), 차량운행비용, 교통사고비용, 환경비용, 불편함 비용 등으로 구성된다. 또한 도로사용자비용의 변화항목으로는 통행시간 변화, 차량운행비 변화, 교통사고 변화, 환경비용 변화, 운영자 수입, 정시성 등이 있다. 결국 공사로 인한 사용자비용은 공사전의 차량 지·정체와 공사 중 차량의 지·정체를 정량적으로 산정하여 그 차이로 나타낼 수 있으며 공사로 인한 도로이용자의 비용변화 또는 추가적으로 부과되는 비용을 의미한다.

2. 사용자비용 모형

사용자비용에 대한 국내의 연구는 주로 도로계획분야를 중심으로 이루어져 왔으며, 생애주기분석에 이를 도입하고자 한 것은 비교적 최근의 경향이다. 사용자비용에 대한 연구는 1980년대부터 이미 교량관리시스템에 생애주기분석을 개발하여 사용하던 미국의 North Carolina주 DOT에서 시작되었으며 그 이후 인디애나주의 IBMS, FHWA의 POINTS 등의 여러 가지 모형이 개발되었고 국내의 경우 건설교통부가 교량관리시스템에 적용하기 위하여 사용자비용 모형을 개발한 바 있으며 미국의 NIST 모형을 바탕으로 개발된 최길대(2001)의 모형 등이 있다.

이와 같은 사용자 비용 산정 모형들은 대부분 거시적인 관점에서 교통량이나 운행비용에 따른 사용자비용 산정식에 바탕을 둔 것으로 실제의 차량 지체도가 반영되지 않아 산정된 시간·운행비용의 신뢰도가 낮은 문제점이 있다. 예를 들어 NIST 모형의 경우 시간지연비용(CTDC)을 다음의 식과 같이 제시하고 있는데,

$$C_{TDC} = \left(\frac{L}{S_a} - \frac{L}{S_n} \right) \times ADT \times N \times w$$

L : 영향 받는 도로의 길이(miles)

S_a : 보수공사기간동안의 교통속도(mile/h)

S_n : 정상상태의 교통속도(mile/h)

ADT : 평균 일교통량(대/일)

여기서 평균일 교통량을 사용함으로써 차량의 지체가 시간대별로 다양하게 변할 수 있음을 반영하지 못하고 있을 뿐 아니라 영향을 받는 도로의 길이나 보수공사 기간동안의 교통속도를 정확하고 논리적으로 예측해낼 수 있는 방법을 제시하지 못하고 있다.

최근에는 기존의 사용자비용 모형의 단점을 보완하고 차량의 동적 특성과 시간대별 교통량의 변화에 따른 차량의 지체도를 비교적 정확하게 산정하는 모형 및 프로그램들이 개발되었는데 QUEWZ모형이나 QuickZone 모형 등이 그 예라 할 수 있다. 다음 절에서는 이러한 모형들의 기본 개념을 알아보고 그 장단점을 비교한다.

3. QUEWZ 모형

QUEWZ(Queue and User Cost Evaluation of Work Zone) 모형은 미국 텍사스에서 개발된 모형으로 처음은 “Air Quality Impacts of Highway Construction and Scheduling” 과제의 일부로 개발되었다. QUEWZ 모형은 차선차단 형태와 스케줄에 따른 추가적인 도로사용자 비용을 계산할 수 있는데 사용자비용 산정방법은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- ① 공사구간의 용량을 추정하기 위해 HCM 2000 모형을 사용한다.

$$C = (1600 + I - R) \times H \times N$$

- 여기서, C : 공사구간의 추정된 용량(vph)
- I : 공사 강도의 영향 (-160~160 vehicle, 기본값 : 0)
- R : 공사구간 진입 램프 영향 (0~160 vehicle , 기본값 : 0)
- H : 중차량 영향계수 ($H = 100 / [100 + P \times (E - 1)]$)
- N : 분석대상 지역의 폐쇄되지 않은 차선
- E : 승용차 환산 계수 (기본값 1.7)

- ② QUEWZ는 차량의 평균속도를 추정하기 위해 교통량-속도 관계를 사

용하는데 용량(정상상태와 차선차단상태)과 시간교통량을 알 때 v/c 가 계산되고 이 v/c 비율에 따라 매 시간별 차량의 평균속도를 다음의 그래프에 의해 추정한다.

③ 속도가 추정되면 QUEWZ는 통행시간비용과 차량운행비용을 계산하는데 통행시간비용은 공사구간을 통과하는데 발생하는 속도 감소에 따른 지체와 대기지체를 포함한다.

④ 대기지체와 대기길이는 HCM에서 제공하는 입출력 분석기술을 사용하여 추정한다. 대기행렬 내의 차량 수는 공사구간의 용량과 통행수요의 차이를 통해 추정되며, 대기행렬 길이는 차량 평균 길이 40ft, 대기행렬의 분포는 공사구간의 상류부에 차선에 고르게 분포한다고 가정한다.

⑤ 모든 차량에 대한 총 대기시간(대·시간)은 간단하게 분석의 시작/종료시간상의 대기를 경험하는 차량의 평균 대수로부터 추정한다. 차량운행비용은 속도변경비용과 차량주행비용의 변화를 포함하고 있다.

4. QuickZone

1998년 FHWA는 사업 진행과정의 4가지 상태(정책, 계획, 설계, 운영)에서 공사구간의 지체를 추정하기 위한 분석 도구인 QuickZone을 개발하였는데 QuickZone은 마이크로 엑셀 기반의 프로그램으로 개발되었으며 다음과 같은 과정을 거쳐 사용자비용이 산정된다.

① QuickZone은 사용자로부터 입력자료를 받아서 프로젝트 기간동안 시간대별로 각 링크의 용량과 수요를 비교하여 지체와 본선의 대기차량증가를 추정하고 통행수요의 시간대와 계절 변동은 통행수요 모듈에서 계산한다.

② 차선이 차단된 링크와 그 링크와 연결된 일련의 링크로 구성된 본선의 대기차량수를 추정한다. 프로그램은 본선의 모든 링크에 대하여 입력-출력 분석(HCM에서 제시되는)을 필수적으로 수행한다.

③ 본선의 첫 번째 링크의 시간 통행수요는 이전 시간의 대기차량수와 이번 시간의 수요의 합으로 계산한다. 그 이후의 하류부 링크의 시간 교통수요는 이전시간의 대기차량수와 본선링크와 다른 상류부 링크의 유입차량수의 합으로 계산된다. 같은 과정을 이용하여 공사구간의 용량감소를 이용하

여 차선차단에 따른 대기길이가 계산된다.

④ 다음으로 QuickZone은 혼잡을 피하기 위해서 통행시간을 변경하는 차량수와 우회경로를 사용하는 차량수를 계산하여 이를 각 링크의 유입량에 반영한다.

⑤ QuickZone은 또한 매 시간 수단을 변경하거나 본선으로의 통행을 포기한 차량수를 계산한다. 이러한 비율은 프로그램에서 사용자 입력값으로 정의된다. 이렇게 집계된 시간별 본선의 지체는 시간의 시작과 끝의 총 차량수의 평균으로 계산된다.

5. FHWA 모형

미국의 FHWA에서는 1998년 “Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design”이라는 보고서(FHWA-SA-98-079)에 공사로 인한 사용자비용 산정 모형을 개발하였는데 이 모형은 QuickZone 모형보다 계산과정이 비교적 단순하고 체계적이며 엑셀 시트상에서 쉽게 개발할 수 있도록 구성되어 있다. 또한 모형의 기본 개념이 HCM의 개념을 많이 적용하고 있기 때문에 어느 정도 이론적인 장점도 있다. FHWA 모형은 다음과 같은 총 12개의 단계로 이루어져 있다.

- | | |
|-----------------------|--------------------|
| ① 미래년도 교통량 계산 | ② 공사구간의 방향별 교통량 계산 |
| ③ 도로용량산정 | ④ 사용자비용의 요소 선정 |
| ⑤ 공사구간의 영향을 받는 교통량 구분 | |
| ⑥ 지체시간 계산 | |
| ⑦ 차량운행비용 원단위 산정 | ⑧ 통행시간비용 원단위 산정 |
| ⑨ 교통량을 차종별로 구분 | ⑩ 차종별 운행비용 산정 |
| ⑪ 공사구간의 총 비용 산정 | ⑫ 사고감소 효과 산정 |

FHWA 모형의 특징으로는 공사구간의 영향을 받는 교통량을 공사구간을 지나가는 총차량수와 지체구간을 지나가는 총차량수로 구분하고 지체구간 통과시에는 차량의 잦은 가감속(Stop-and-go)에 따른 추가 시간·운행비용을 별도로 계산한다는 것이다. 또한 공사구간의 속도는 공사구간에 규

정된 제한 속도를 적용하며 대기행렬 내에서의 속도는 HCM에서 서비스수준 F에서의 V/C와 속도의 관계 그래프를 사용한다.

6. 사용자비용 모형의 비교

차량의 지체시간 및 속도를 정확하게 산정하기 위해서 최근에 개발된 QUEWZ나 QuickZone 모형들은 이전의 사용자비용모형들 보다는 교통류의 동적특성을 잘 반영하고 있다고 볼 수 있다. 그러나 이들 모형도 지체길이나 속도산정 등에 있어 다소 불합리한 요소를 포함하고 있는데 예를 들면 QUEWZ에서는 지체구간에서의 차량의 길이를 12ft로 일정하다고 가정하고 있으며 QuickZone에서는 본선부의 지체도에 가장 영향을 크게 미칠 수 있는 우회교통량과 통행시간 변경교통량에 대한 자료의 구득이 쉽지 않다는 문제점이 있다. 또한 FHWA 모형에서는 대기행렬내에서 차량이 1회의 stop-and-go를 경험하는 것으로 가정하는 등의 한계가 있다. 여러항목별로 이들 세가지 모형을 비교하면 다음의 표와 같으며 대체적으로 QuickZone의 정밀도가 가장 높으나 많은 입력자료를 필요로 함이 또한 그 단점이다.

〈표 1〉 사용자비용 산정모형의 비교

구분	QUEWZ	QuickZone	FHWA
교통량자료	시간별, 방향별자료	시간별, 방향별자료	시간별, 방향별자료
공사구간용량	중차량, 램프 등을 변수로 하는 관계식	별도의 용량값 사용	HCM의 공사구간 용량 테이블 사용
대기행렬길이	차량1대 길이 (12m)가정	자료없음	밀도, 속도 관계식이용
계산형태	1시간 단위 계산	시뮬레이션 (1시간 단위)	1 시간단위 계산
네트워크 기능 (우회경로분석)	없음	있음	없음
지체구간속도	$SP=SP3(2-V/C)$ 식 사용	자료없음	HCM의 V/C-속도 관계그래프 사용
프로그래밍	엑셀기반	엑셀기반	엑셀기반
결과물	사용자비용, 교통상황, 교통량	사용자비용, 통행행태, 우회정보	사용자비용, 교통상황, 교통량
정밀도	낮음	보통	다소 낮음
프로그래밍 간편성	간편	다소복잡	간편

IV. 결론

본 연구에서는 고속도로에서의 주요시설물에 대한 경제적이고 효율적인 계획 및 설계를 위해 최근에 대두되고 있는 생애주기비용에서의 사용자비용 모형에 대하여 살펴보았다. 비교적 최근에 개발된 QUEWZ 모형 및 QuickZone, FHWA 모형 등은 이전의 사용자 비용모형보다 그 정확도 측면에서 상당한 개선이 이루어졌음을 알 수 있었다. 하지만 이러한 모형들도 지체속도나 지체길이 산정에 있어 아직 근사식에 의존하는 등의 문제점이 있으며 또한 이들 모형을 우리 실정에 맞게 적용하기 위해서는 입력계수들의 보정을 위한 현장관측의 노력이 필요하다. 또한 각 모형의 장점만을 결합한 새로운 모형의 개발도 향후 과제로서 제안을 하고자 한다.

참고문헌

1. 건설교통부(2001), "LCC개념을 도입한 시설안전관리체계 선진화방안 연구".
2. 최길대(2001), "생애주기비용예측기법을 활용한 도로시설물 유지관리체계 개선방안에 관한 연구", 중앙대학교 박사학위논문.
3. 한국도로공사(2002), "고속도로 교량의 구성요소별 생애주기비용(LCC) 분석 연구".
4. 한국도로공사((2001), "LCC기법을 이용한 교량형태별 경제성 분석 및 경제적 수명예측에 관한 연구".
5. 한국시설안전기술공단(2004), 교량생애주기비용 분석을 위한 사용자비용 산정프로그램 개발.
6. FHWA(1998), "Life Cycle Cost Analysis in Pavement Design".
7. Illinois TRC(2003), "Evaluation of Construction Work Zone Operational Issues : Capacity, Queue, and Delay".
8. New Jersey DOT(2001), "Road User Cost Manual".
9. US DOT(2002), "Life-Cycle Cost Analysis Primer".