

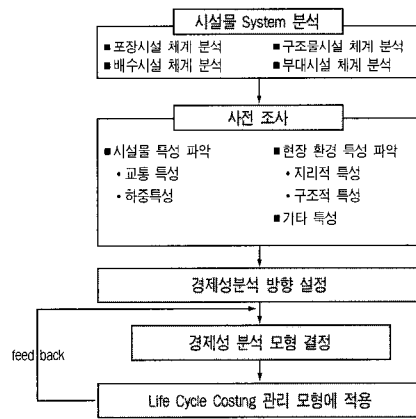
도로 경제성분석 최적시스템 구축 방안

오경환 · 한석엔지니어링 도로부 이사

I. 개요

도로 사업의 타당성 조사를 위한 경제성 분석시 현재 시행되고 있는 방식은 B/C ratio, IRR, NPV, PBP등에 의해 투자비용과 편익을 단순 비교하거나, 투자비의 일정 부분을 유지보수비로 간주하고 이를 합산하여 사업의 총 투자비용과 비교하여 산출하고 있다. 이러한 관리 기법은 사업 전체의 투입비의 결과를 제시할 뿐 도로 기능별 교통 하중형태에 따른 투자 효과에 대한 검증은 산출하기 곤란하다.

여기서는 실제 도로상을 주행하는 차량의 각종 하중형태별, 시설별, 지역별 환경 조건에 의해 좌우되는 공용성의 결과를 해석하여 시설물의 구조적수명보다는 경제적수명에 주안하여 도로기능을 최적화함과 동시에 가장 경제적으로 도로 시설을 관리하는 기법을 제시하고자한다.



II. 체계구축을 위한 접근 방법

1. 도로시설체계 분석

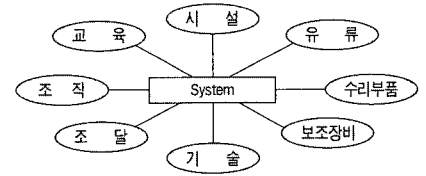
1) 도로시설체계 분석의 틀

(1) 체계비용 관리

① 도로사업을 효율적으로 시행하기 위해서는 사업의 전체적인 체계를 분석하고 종합적 관리가 되도록 운영하여야한다.

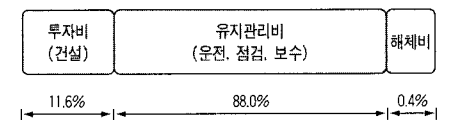
② 여기서 체계(System)란,

장비와 숙련된 기술로 이루어진 하나의 완전한 업무 수행 도구로서 주어진 상황에서 독자적으로 운영되어지는 기본단위이며, 장비 및 시설 자체 뿐만 아니라 이를 운영·유지하는데 필요한 제반시설, 보조 장비, 조달, 서비스및 이를 조작하는 인적 자원의 총체이다.



③ 시설물을 효과적으로 관리하기 위해서는 시설물의 기획·타당성조사·설계·시공·유지보수 및 폐기에 이르는 전 과정에 걸쳐 투입되는 비용과 이에 대한 효과를 상호 비교, 분석하여야 합리적인 관리가 가능하다.

④ 시설물의 수명주기를 놓고 분석하면, 수명주기비용 중에서 유지보수비가 차지하는 부분은 다음과 같이 가장 크게 차지한다.



⑤ 그런데, 효율적인 사업관리를 위해서는 적정 유지비의 규모일 것이다.

- 투입 비용 < 적정 유지보수비 일 때에는 관리품질이 저하되고, 시설물의 수명이 단축되며
- 투입 비용 > 적정 유지보수비 일 때에는 관리효율이 저하되므로 유지보수비의 규모를 결정하는 것은 현실적으로 매우 어려우나 과학적인 방법으로 접근하여 최선의 방법을 도모한다.

(2) 도로 시설에 미치는 영향 요소

국내에서 통상적으로 투자비의 일정 비율을 유지보수비로 간주하여 LCC를 산출하는 개념에서 벗어나 근본적으로 재고할 필요가 있다.

어떠한 체계(System)건 간에 궁극적인 목표는 체계에 부여된 기능에 대한 성공적인 성능(Performance)의 발휘로서, 이는 체계효능(System effectiveness)으로 나타나며, 체계가 주어진 시간동안 체계에 요구되는 제 조건을 성공적으로 달성될 수 있는 확률로 표시된다. 체계효능은 System의 설계 단계, 시공(생산)단계 및 운영단계의 운영 방식에 의하여 영향을 받는다.

따라서, 체계효능은 신뢰도(Reliability), 가용도(Availability) 및 보수도(Maintainability)등의 함수이다.

① 신뢰도(Reliability)

주어진 System이 사용될 경우에는 반드시 특정 환경에 놓이게 되며, 이는 특정 시간 동안에 기능장애를 일으키지 않을 확률로서, System이 어떻게 사용되며, 어떠한 조건에서 운영되는가에 달려있다. 신뢰도(Reliability)란 System이 수명주기(T) 내에서 주어진 시간(t) 동안에 문제 없이 운영될 확률로서 나타나며 그 하자율이 일정하게 반복되거나 시간적으로 변한다.

② 가용도란 어느 시점에서 System이 만족스럽게 가동할 확률이므로, 가용도는 운용시간(Operating time)과 정지시간(Down time)만이 고려된다.

③ 보수도(Maintainability)

비정상적인 system을 주어진 정지시간 내에 정상적인 상태로 회복시킬 수 있는 확률이다. 작업시 λ 및 μ는 다음과 같이 조사하여 반영한다.(Ⅲ장(2) 참조)

$$\lambda = \frac{\text{결함 발생 횟수}}{\text{System 운영 주기(시간)}}$$

$$\mu = \frac{\mu = \text{보수 횟수}}{\text{System 운영 주기(시간)}}$$

2) 수명주기비용(LCC) 관리 방안

(1) 개요

① 수명주기비용(Life cycle cost)

시설물의 LCC(수명주기비용)은 시설의 수명주기 동안에 발생하는 전체비용(기획, 설계, 시공, 유지보수 및 폐기비용)의 합이다.

즉, $LCC = \Sigma(\text{Total cost during LC})$

② Life cycle costing (LCC)은 시설물 투자에 관한 보다 효과적인 의사결정을 위하여 LCC에 근거한 제반 경제적 평가 방법이다. 이러한 측면에서 LCC 기법은 설계, 시공단계 뿐만 아니라 전체 사용기간 동안의 전략적 의사결정을 위한 필수적 관리수단이다.

③ 시설물의 경우 위에서 설명한 바와 같이 수명주기가 매우 긴 관계로, 물리적 수명동안 사용할 경우 유지관리비가 초기 건 설비의 수배(3~5배)에 이르는 경우가 대부분이다. 그러므로 시설물에 관한 의사 결정시 올바른 판단을 위해서는 LCC 기법을 적용하지 않는 것은 매우 위험할 것이다.

(2) LCC 산정

$$TC_n = IC_n \cdot PW_i + RC_n \cdot PW_i$$

여기서, TC_n : 연간 총 소요비용

RC_n : 연간 유지관리비

IC_n : 초기 투자비

PW_i : 현재가치수

최적 경제수명을 추정분석하기 위해서는 먼저 매년별로 투입되는 초기투자비와 유지관리비를 파악하여 이 둘을 동일 시점을 기준으로 현재가치처리한 후 계산한다.

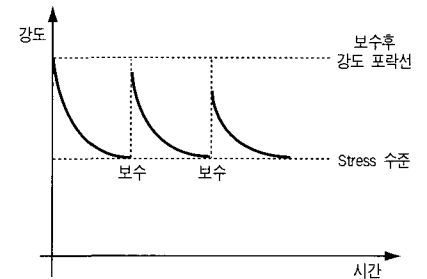
(3) LCC 구성 항목

구 성 항 목	내 용
Planning cost(기획비)	- 계획비 - 타당성 조사비
Design cost(설계비)	- Engineering fee
Construction cost(건설비)	- 직접공사비 - 간접공사비(현장관리비, 산재보험료, 관리비등)
Running cost(운영/일상(소)수선비) (Operation & maintenance cost)	- 일반관리비 - 청소비(오물수거비 포함) - 일상(소)수선비 - 전기료/수도료/난방비
Running cost(장기(주요)수선비)	- 포장/구조물/배수/기타시설
Remaining value & removal cost(폐기처분비)	- 잔존가치 - 폐기처분비

2. 경제적 수명관리

1) System의 수명

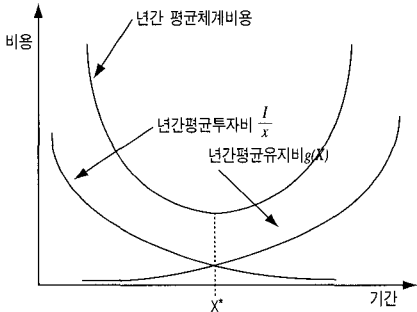
System이 보유한 강도(Strength)는 시간이 경과함에 따라 외력에 의한 Stress 수준 이하로 떨어져 문제가 발생하였을 경우 유지 보수를 통하여 강도를 다시 회복시킬 수 있다. 이 경우 System의 강도는 보수 전보다는 향상되지만 보수되지 않은 부위는 약화된 상태로 있으므로 System 원래의 강도를 되찾기는 불가능하므로 강도 포락선은 점점 감소하여 종국에는 다음과 같이 보수불능의 상태에 이른다.



2) 경제적 수명관리

유지보수시 보수한다고 수명이 무한정 연장되는 것은 아니며 일정기간이 지나면 재시공하여 사용하는 것이 전체적인 비용 측면에서 효과적일 것이다. 따라서, 유지보수비의 투입을 투입을 중단하고 재시공하여야 할 효과적인 시점은 비용효과적으로 볼 때, System 비용으로서 총비용(X*)은 투자비와 유지보수비의 합이 최소가 되는 지점이다.

즉, $G(x) = \text{Min} [g(x) + \frac{I}{x}]$ 가 경제적인 관리 지점이다.(Algorithm 참조)



실제로 현장에서 체계비용을 관리할 때에는 가장 경제적인 지점(X)을 찾는 것이 무엇보다도 중요하며, 이를 위한 Data 수집을 향후 지속 조사하여 적용하면 매우 신뢰도가 높은 수명주기비용을 산출할 수 있다.

4. 경제적 수명주기비용 모형 설계

1) 시설물의 기능 분할

각 시설물별 기능 및 설계개념이 상이하고 역학적 기능이 다르므로 유사한 성격을 갖는 시설을 지역별, 기능별로 다음과 같이 분류하여 적용하였다.

- (1) 포장 시설
- (2) 구조물 시설
- (3) 배수 시설
- (4) 부대 시설

2) 관리 모형

사업에 소요되는 비용은 건설에 투입되는 투자비와 위와 같이 Grouping된 각 시설별로 발생하는 결합에 따른 보수 비용의 합으로서 나타나므로 아래와 같은 Polynomial regression model을 적용한다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4 + \epsilon_i$$

$$= \beta_0 + \beta_1x_i + \epsilon_i$$

이때, $\beta_0 \sim \beta_4$: parameter

y_i : 각 System별 유지보수 비용

y_1 : 포장시설 유지보수비

y_2 : 구조물시설 유지보수비

y_3 : 배수시설 유지보수비

y_4 : 부대시설 유지관리비

x_i : 각 System 내부 발생 하자율

x_1 : 본선, 연결로, 부체도로, 포장시설하자율,

x_2 : 교량, 터널, 옹벽, 구조물시설하자율

x_3 : 측구, 배수관, 암거, 배수시설하자율

x_4 : 교통관리시설, 교통안전시설, 부대 시설, 부대시설하자율

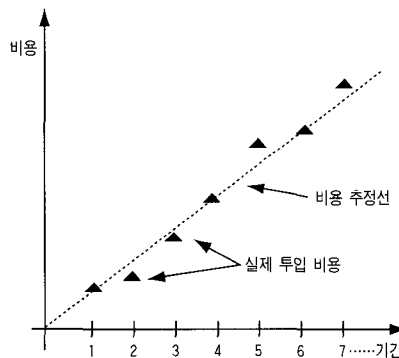
ϵ_i : 오차

3) Parameter 산정

$$\beta \Rightarrow (x'x)^{-1} (x'y)$$

4) 비용관리 모형

결합시 발생하는 보수 모형은 비용의 함수이므로 비용관리모형은 다음과 같이 나타난다.



$$y = b_0 + b_1X$$

여기서, X : x_1, x_2, x_3, x_4 를 포함한 비용 함수

III. 경제적 수명주기비용 모형

1. 경제적 비용관리 절차

1) 비용 영향 요소 산정

(1) 신뢰도(Reliability)

결합 발생 확률 $F(t) = \text{Probability}\{T \leq t\}$

신뢰도 $R(t) = P\{T > t\} = 1 - F(t)$

실제 현장에서 점검시 시설물에 발생하는 하자의 발생시간 및 간격을 점검하여,

① 하자율이 일정하게 발생하면(지수 분포)

하자율 $h(t) = \lambda$

확률밀도함수 $f(t) = \lambda e^{-\int_0^t \lambda ax} = \lambda e^{-\lambda t}$

$F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda x} ax = 1 - e^{-\lambda t}$

$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t}$

② 하자율이 시간적으로 변화면(Rayleigh 분포)

하자율 $h(t) = \lambda t$

확률밀도함수 $f(t) = \lambda te^{-\int_0^t \lambda xax} = \lambda te^{-\frac{\lambda t^2}{2}}$

$F(t) = \int_0^t \lambda xe^{-\frac{\lambda x^2}{2}} ax = 1 - e^{-\frac{\lambda t^2}{2}}$

$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\frac{\lambda t^2}{2}}$

(2) 가용도(Aailability)

$$A = \frac{E(T)}{E(T) + E(D)} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

$$= \frac{\frac{1}{\lambda}}{\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu}} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

MTBF : Mean time between failure

MTTR : Mean time to repair

이때, $MTBF = E\{T\}$

$$= \int R(t)dt = \int e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

(3) 보수도(Maintainability)

$$M = \frac{\text{Mean down time}}{MTBF}$$

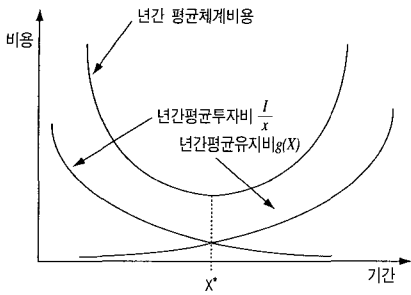
$$= \frac{\frac{1}{\mu}}{\frac{1}{\lambda}} = \frac{\lambda}{\mu}$$

작업시 λ 및 μ 는 다음과 같이 조사하여 반영한다

$$\lambda = \frac{\text{결합 발생 횟수}}{\text{System 운영 주기(시간)}}$$

$$\mu = \frac{\mu = \text{보수 횟수}}{\text{System 운영 주기(시간)}}$$

2) 비용관리 Algorithm



체계비용은 총비용(X^*)은 투자비와 유지보수비의 합이 최소가 되는 지점이다.

$$\text{즉, } G(x) = \text{Min} \left[g(x) + \frac{I}{x} \right]$$

System별 유지보수비 추세선은,

$$y = \beta_0 + \beta_1 x$$

따라서, System별 평균 유지비는

$$y = \frac{\sum_{x=1}^x (\beta_0 + \beta_1)}{x}$$

체계비용은 투자비와 유지보수비의 합이므로, System별 평균 체계비용은

$$G(x) = \frac{I}{x} + \frac{\sum_{x=1}^x (\beta_0 + \beta_1)}{x}$$

$$= \frac{I}{x} + \frac{x(2\beta_0 + \beta_1 + \beta_1 x)}{2x}$$

최소 비용점은 $G'(x) = 0$ 인 점이므로

$$G'(x) = \frac{I}{x^2} + \frac{\beta_1}{2} = 0$$

$$\text{따라서, 경제적인 수명 } x = \sqrt{\frac{2I}{\beta_1}}$$

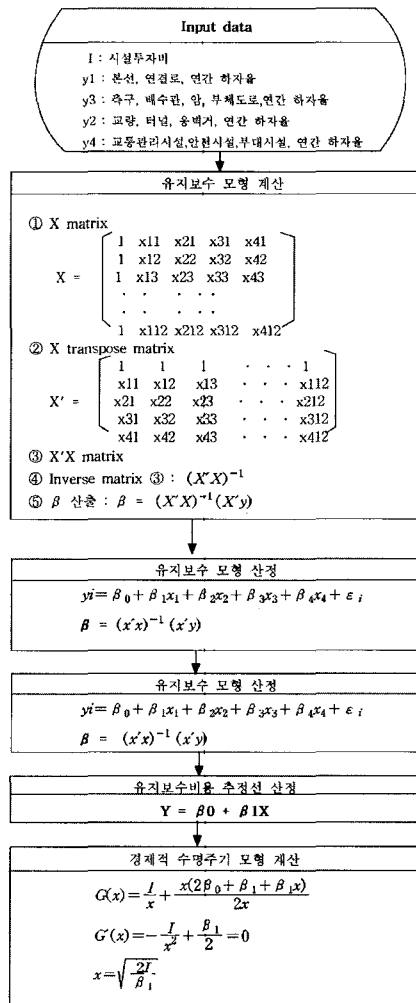
이때, x : 사용기간(년)

I : 초기투자비

β_0, β_1 : 추정계수

경제적인 수명주기비용 관리의 Algorithm 은 다음과 같다.

2. 비용관리 모형



IV. 결론

우리나라는 국토의 70% 이상이 산지로 구성되어 있어 도로 종단선형상 오르막구간이 필연적으로 매우 많이 발생된다. 또한 도로상 중차량이 혼입율이 높은 관계로 도로관리상 유의하지 않으면 국가적으로 막대한 유지관리비를 소모할 수 밖에

없는 실정이다. 따라서, 구조적으로 수명이 잔존하더라도 시설물의 시스템적 수명 주기비용을 추적하여 경제적으로 최적의 비용효과적인 관리지점을 찾는 것은 매우 유용할 것이다.

또한, 우리나라는 도로 설계 및 시공시 중차량혼입율이 높은 도로에는 콘크리트 포장을 선택하는 등 정성적인 LCC개념을 적용하고 있지만 정량적인 분석에 의해 시행된 사례는 드물다. 이는 LCC평가법 및 이를 뒷받침할 자료가 부족하기 때문일 것이다.

여기서는 이러한 관점에 주안하여 도로의 타당성조사단계에서부터 LCC에 입각하여 도로 위계상 간선도로에서 국지도로에 이르기까지 도로기능별, 지역별 Data를 수집하여 가장 경제적인 도로관리 모형을 추정하여 비용절감 요소가 어디에 있는 지 파악하고자 노력하였다.

이상과 같은 과정을 거쳐 산출된 모형을 적용시 기대되는 효과는 다음과 같다.

첫째, 현행 사업 투자비의 적정성에 대한 판단 기준이 명확해질 것이며,

둘째, 비용/편익 계산이 명확해짐으로써 효율적인 사업 관리가 가능하고

셋째, 도로기능별(주간선도로, 보조간선도로, 집산도로, 국지도로) 비용관리에 대한 축적된 자료를 적용시에 도로기능별 공용성 특성이 파악되며, 도로관리의 운영비를 대폭 절감할 수 있을 것으로 사료된다.