

가용정보를 활용한 기획 및 설계초기 단계의 도로 공사비 예측모델

Cost Prediction Models in the Early Stage of the Roadway Planning and Designbased on Limited Available Information

곽수남*	김두연**	김병일***	최석진****	한승헌*****
Kwak, Soo Nam	Kim, Duyon	Kim, Byoungil	Choi, Seokjin	Han, Seung Heon

요약

공공사업에서 사업초기단계의 개략공사비 예측은 발주자에게 향후 공사비에 대한 정보를 제공함으로써 효율적인 예산수립을 가능하게 한다. 하지만 사업초기단계는 획득 가능한 정보량이 부족하기 때문에 상대적으로 정확한 공사비 예측이 어렵다. 현재 국내 발주기관에서 활용하고 있는 도로공사 개략공사비 산정체계는 단순하게 단위길이 당 단가에 도로의 연장을 곱하는 선형적인 모델이기 때문에 공사비 예측에 오차가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 또한 사업의 진행에 따라 가용정보의 수준이 달라지기 때문에 개략공사비 예측모델에는 이러한 가용정보의 특성이 반영되는 것이 중요하다. 본 연구에서는 사업초기단계를 크게 기획단계와 설계 초기단계의 두 단계로 구분하여 각 단계의 가용정보 수준 및 공사비 예측의 목적을 고려한 개략공사비 산정모델을 제시하였다. 공사비 예측모델의 개발을 위하여 총 143건의 공사 데이터를 수집하여 활용하였으며, 이를 통해 각 단계의 가용정보 수준에 적합한 공사비 영향변수를 도출하였다. 제안된 기획단계 및 설계초기 단계의 개략공사비 산정모델은 검증과정을 통하여 각 단계에서 요구되는 정확도 수준을 확인하였으며, 이러한 가용정보 수준에 입각한 개략공사비 산정모델은 향후 예산 산정업무나 타당성 조사, 노선 대안 비교검토 등에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

키워드: 도로공사, 사업비 예측모델, 사례기반추론, 다중회귀분석

1. 서론

건설공사비를 산정하는 방법은 일반적으로 견적 수준에 따라 상세견적기법과 개략견적기법으로 크게 구분된다. 상세견적기법

은 실시설계가 완료되어 시설물의 설계 정보가 확정된 후 도면에 기초하여 공사비를 산정하는 방법을 말한다. 반면 개략견적기법은 기획 및 타당성분석이나 초기 설계단계에서 해당 시설물에 대한 부분적인 정보 또는 과거 사례에 기초하여 공사비를 예측하는 방법으로서 단계 및 수행주체에 따라 다양한 목적을 갖고 수행된다. 개략공사비는 국가 또는 지방자치단체의 효율적인 예산편성과 함께 건설사업의 추진 타당성을 검토하는데 사용되며, 해당 시설물의 다양한 대안을 검토하여 의사결정을 수행하기 위해서도 활용되기 때문에 그 중요성이 매우 크다.

하지만 일반적으로 토목공사는 설계, 공법, 재료 등이 표준화되어 있지 못하고, 토목사가 많은 부분을 차지하여 재료의 양을 정확하게 파악할 수 없기 때문에 건축공사 등에 비해 공사비 예측의 정확도가 낮은 편이다(박중현, 2001). 더욱이 도면이 존재

* 일반회원, 롯데건설, 공학석사 wheelof80@hotmail.com

** 일반회원, 연세대학교 토목환경공학과, 공학박사
cagedbird@yonsei.ac.kr

*** 일반회원, 연세대학교 토목환경공학과, 공학석사
ikim@yonsei.ac.kr

**** 일반회원, 연세대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정,
sjchoi@yonsei.ac.kr

***** 종신회원, 연세대학교 토목환경공학과 부교수, 공학박사(교신저자),
shh6018@yonsei.ac.kr

본 연구는 국토해양부 건설기술기반구축사업의 연구비 지원에 의한 연구의 일부임. 과제번호 06기반구축A03

하지 않는 초기 단계에서는 가용정보의 수준이 낮아 정확한 예측이 쉽지 않은 특성을 갖고 있다.

현재 국내 도로공사의 경우, 국토해양부의 도로업무편람(2007) 또는 한국개발연구원의 예비타당성조사 표준지침(2004)에서 제시된 개략공사비 산정기준을 활용하도록 하고 있다. 이러한 현행 개략공사비 산정 기준은 과거의 설계사례를 단순산술평균을 하여 단위길이 당 공사비를 제시하는 선형적 모형이기 때문에, 도로 공사비에 영향을 미치는 다양한 공사특성을 반영하고 있지 못하며, 설계 공사비와 비교할 때 정확도가 낮아 그 활용에 현실적으로 어려움이 있다.

본 연구는 상세설계 이전의 초기 단계에서도 공사비 산정의 목적 및 가용정보의 수준이 달라진다는 점에 주목하여, 단계별 가용정보에 기초한 초기단계 개략공사비 산정 체계를 제시하고자 한다. 이를 위해 전체 단계를 두 단계로 구분하여, 기획단계 모델은 예산편성 및 (예비)타당성 조사에 활용할 수 있도록 구성하였으며, 상세도면이 작성되기 이전인 초기 설계단계에는 다양한 공사의 특성을 고려하여 일정수준의 오차범위 내에서 대안노선 평가 및 최종노선 선정에 활용될 수 있는 도로사업의 개략공사비 산정모형을 개발하고자 한다.

2. 기존 연구 고찰

2.1 현행 도로공사 개략공사비 산정기준 고찰

국내에서 도로공사 개략공사비 예측을 위하여 활용되고 있는 기준은 국토해양부(2007)의 '도로업무편람'과 한국개발연구원(2004)의 '도로·철도 부문사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구'가 있다. 현재 초기 설계단계에 맞추어 특화되어 개발된 모형은 존재하지 않고 예비타당성조사 단계에 활용되고 있는 모형을 준용하고 있거나 수치지형도를 취득할 수 있는 지역에서는 전산작업과 전문가의 경험과 직관에 의존하여 개략공사비를 예측하도록 하고 있다.

국토해양부(2007)는 2006년 발주된 신규 국도사업의 설계단가 평균치를 산출하여 표1과 같이 도로건설 단가를 제시하고 있는데, 이 단가는 다양한 공사의 특성을 반영하고 있지 못하고 국도를 단지 지방부와 도시부로만 구분하여 도로 연장 당 단가를 구분하고 있다. 그 결과 국도 6차로 이상은 사업비 산출 시에 폭원 등을 기준으로 일정 계수를 적용하여 산출해야 하는 한계를 갖고 있으며, 단순산술평균에 불과하기 때문에 지역적 특성 및 도로의 설계기준, 공종별 특성 등을 고려하지 못하고 있다.

표 1. 도로업무편람의 일반국도건설 단가 (국토해양부, 2007)

(단위: 억 원/km, 제압비 포함)

구분	차로수	계	시설비	용지비
지방부(국도, 확장)	2 ~ 4	141	126	15
도시부(국대도, 신설)	4	182	154	28

표 2. 예비타당성조사 표준지침의 구조물구간 비율에 따른 토공구간 표준 공사비 (한국개발연구원, 2004)

(1999년 기준, 단위: 억 원/km)

토공구간 비율	신설(4차로)		신설(6차로)		확장(4·6차로)	
	도시	지방	도시	지방	도시	지방
80~90	96.6	69.7	131.6	100.2	44.4	40.5
80~85	109.9	79.3	149.7	114.3	50.5	46.1
75~80	124	89.5	169	129.3	57	52
70~75	139.1	100.4	189.6	144.7	63.9	58.3
65~70	155.3	112.1	211.7	161.6	71.4	65.1
60~65	172.8	124.7	235.5	179.7	79.4	72.5
55~60	191.6	138.3	261.1	199.3	88.1	80.4
50~55	212.3	153.2	289.3	220.8	97.6	89

한편 한국개발연구원(2004)은 예비타당성조사의 객관성과 사업간 평가의 일관성을 제고하는 것을 목적으로 도로 사업의 비용을 추정하는 기준을 표2와 같이 제시하고 있다. 이 방식은 공사비를 구조물 설치구간과 그 외의 토공구간으로 구분하여 제시하고 있으며 수치지형도 취득 여부에 따라 공사비 산정 기준을 제시하고 있어 국토해양부(2007)의 기준보다 우수한 형태라 할 수 있다. 그러나 상기 공사비는 고속도로를 기준으로 한 금액으로서 다른 등급의 도로에 적용할 경우에는 도로폭원에 비례하여 적용되며, 이러한 단순비례식은 도로등급에 따른 공사비 차이를 반영하지 못하여 오차를 크게 나타낸다. 또한 공사비 분석기준년도를 1999년으로 적용하여 최근 건설환경의 변화를 반영하고 있지 못하고 있으며, 국토해양부 기준과 마찬가지로 다양한 지역 및 공사의 특성을 반영하지 못하는 한계를 가지고 있다. 공사비는 발주처, 현장의 위치 및 조건 등을 매개로 변화하며, 특히 지형적 조건에 따라 토공 비용에 큰 편차가 발생하기 때문에 개략공사비 산정에 있어 해당 공사의 특성을 반영하는 것이 매우 중요하다.

2.2 국외 도로공사 개략공사비 예측모형

도로공사 개략공사비 예측모형 구축의 시사점을 도출하기 위하여 미국의 주요 주정부 교통부(DOT)를 중심으로 도로공사비 예측모형을 분석하였다. 먼저 뉴저지 DOT의 경우 공사유형을 신설, 전면적인 확장공사, 확·포장 공사, 포장공사, 보수공사, 교차로 개선공사, 교통시설공사 등 7가지로 구분하고, 각각에 대한 공사비 예측모형을 제시하고 있다. 각 공사유형은 다시 9개의 공종으로 구분되는데, 토공, 배수공, 암거공, 교량공, 포장공, 부

대공, 조경공, 소음방지공, 친환경공으로 분류하고 있다. 텍사스 DOT의 경우, 공사유형, 차선수, 지역특성, 포장종류 등에 따라 22가지의 도로단면을 제시하고 설계진척 단계를 4단계로 구분하여 입력변수의 수를 증가시키는 기준을 제시하였다. 또한 유타 DOT는 공중 구분에서 약간의 차이는 있으나 텍사스 DOT와 유사한 개략공사비 산정기준을 활용하고 있다.

이상의 미국 각 주정부 DOT에서 활용되고 있는 공사비 산정 기준의 공통점은 사업의 추진단계별로 입력수준을 달리하는 모형을 제시하고 사업의 특성별로 서로 다른 산정모형을 제시하고 있으나, 기본적으로 대표공종과 그 단가만 DOT에서 제시하고 수량은 사용자가 직접 입력하는 방식이라는 점이다. 이러한 각 DOT 공사비 산정기준이 시사하는 바는 해당 프로젝트의 진행단계에 따라 달라지는 정보 양의 변화를 인식하고 있다는 점이다. 초기단계에 있어서도 단계변화에 따라 달라지는 정보의 수준에 맞춰 입력정보의 수준을 달리함으로써 실무적으로 활용성이 높은 체계를 구축하고 있다. 다만 대부분의 입력정보를 사용자의 결정에 의존하고 있기 때문에 설계도면이 없는 단계에서는 정확도의 수준이 낮아지고 일정 수준 이상의 전문가가 아니면 활용이 어렵다는 단점이 있다.

2.3 개략공사비 관련 연구동향 고찰

공사비 예측과 관련된 연구는 건설관리 분야의 오랜 연구주제로, 예측 목적에 부합하는 정확도를 보이기 위하여 다양한 방법론으로 연구가 추진되어 왔다. Chou 외(2005)는 확률적 시뮬레이션 기법을 사용한 모형을 제시하였다. 텍사스 DOT에서 수행한 사례를 수집하고 대표공종을 정의한 뒤 각 공종에 대하여 Box plot을 활용하여 통계적 분석을 하였다. 최종적으로 몬테카를로 시뮬레이션으로 공사비를 예측할 수 있는 모델을 제시하였다. Wilmot과 Mei(2005)는 기존의 통계적인 방법에 의한 공사비 예측의 한계를 지적하고 인공신경망(Artificial Neural Network)을 도입한 공사비 예측모형을 제시하였다. 이를 위하여 고속도로 공사비지수, 자재비, 인건비, 장비비, 계약의 성격 등 공사비에 영향을 미치는 인자를 규명하고 기 수행된 공사비 관련 자료를 이용하여 인공신경망을 훈련시킴으로써 공사비를 예측할 수 있는 모형을 제시하였다. 한편 Liu와 Zhu(2007)는 기존 연구가 건설사업 진척단계별로 가용정보의 수준이 다를 고려하지 않았다는 점을 지적하면서, 건설사업 추진절차를 개념설계, 실시설계, 입찰, 착공전의 4단계로 구분하고 각 단계에서 획득 가능한 공사비 영향인자를 도출한 뒤 상관관계분석을 통하여 단계별로 주요 영향인자를 제시하였다.

한편 국내의 경우, 신진수(1999)와 김선국 등(2000)은 1985년부터 1997년까지 수행된 도로공사 프로젝트에 대한 실적자료를 수집하여 건설사업비 산정체계를 구축하고자 하였다. 실적자료를 체계적으로 구축하기 위하여 도로공사 공사비에 영향을 주는 요인을 공중별로 '공사개요적 요인'과 '시공관리적 요인'으로 나누어 기존의 실적자료를 정리하였으며 상관분석과 회귀분석을 수행하여 도로 공사비를 예측하였다. 그러나 도로공사의 공사비를 단순히 일반국도 확포장과 고속도로 신설로 구분하여 제시하고 있을 뿐 공사비에 영향을 주는 다양한 요인을 고려한 개략공사비 예측모형을 제시하지는 못하였다.

박종현(2001)은 건설사업의 추진단계별로 획득 가능한 정보의 수준이 다를 지적하고 단계별 가용정보를 활용하여 3단계의 개략공사비 예측모형을 제시하였다. 공사비 모형 I은 기획단계에, 공사비 모형 II은 기본설계단계에, 공사비 모형 III은 기본설계과정에서 획득 가능한 정보를 입력변수로 갖고 공사비를 예측하고자 하였다. 이를 위하여 1996년부터 2000년에 국도 및 지방도 중심의 도로공사 설계내역서와 수량산출서를 수집하였다. 하지만 이 연구에서도 각각의 공사비 모형에 도로의 설계기준과 같은 공사비 영향인자가 반영되지 않았고, 수집된 사례가 30건으로서 국도와 지방도가 혼재되어 있어 정확성에 한계가 있었다.

현행 개략공사비 산정기준 및 미국 DOT의 공사비 산정체계, 관련 연구동향 고찰결과를 종합할 때, 보다 실무적이고 정확한 개략공사비 산정모델의 개발을 위하여 전제되어야 할 요건을 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 사업의 추진단계에 따라 구분된 모델의 개발이 필요하다. 단계별 진행에 따라 가용정보의 수준이나 공사비의 예측목적 등이 달라지기 때문에 이러한 단계 구분은 필수적이라 할 수 있다.

둘째, 보다 다양한 공사 특성정보를 반영하여 공사비 예측이 이루어져야 한다. 공사비 예측결과의 정확성의 향상을 위해서는 도로의 등급, 설계속도, 시종점 등의 위치, 지형 등의 특성을 반영할 필요성이 있다.

셋째, 실제 개략공사비 산정업무를 활용하는 사용자의 특성을 고려할 때, 설계 전문가가 아니어도 해당 사업의 특성 정보를 활용하여 쉽게 공사비 산정 과정을 진행할 수 있는 체계가 요구된다.

3. 개략공사비 산정단계의 정의

앞서 논의한 바와 같이, 개략공사비 산정은 건설사업의 추진단계별로 다양한 목적을 갖고 수행되며 그 목적에 따라 요구되는

정확도 수준이 다르다. 또한 추진단계별로 가용정보의 수준이 다르기 때문에 개략공사비 산정모형의 개발에 앞서 적용단계, 혹은 적용범위를 설정해야 한다.

국토해양부의 현행 공공도로 사업절차는 크게 기획단계와 설계단계로 구성된다(표 3). 기획단계에서는 타당성조사를 통한 대상사업 선정을 주목적으로 하여 예산배정을 진행한다. 설계단계는 노선대안선정, 현장조사, 도면작성 및 세부물량산출의 세 단계로 구분되며, 이 중 노선대안 선정 단계에서는 각 노선대안의 비교 검토를 통해 최적노선을 결정하게 된다. 노선이 결정되면, 현장조사를 통해 실제 지반조건 등을 확인하고, 토공계획과 선형, 구조물 형식 등을 결정하게 된다. 현장조사가 완료되면 획득된 정보를 바탕으로 도면을 작성하고, 세부공종별 물량을 산출하여 최종적으로 공사비를 산정하게 된다.

표 3. 공공도로사업 추진절차

단계	목적	공사비 산정기준
기획	<ul style="list-style-type: none"> 타당성 조사 대상사업선정 노선대안 도출 	· 단위길이당 공사비
설계	노선대안선정 <ul style="list-style-type: none"> 최적노선 결정 구조물 위치/형식 선정 	· 단위길이당 공사비
	현장조사 <ul style="list-style-type: none"> 토공계획 선형/표장 설계 구조물 기본설계 	· 단위길이당 공사비
	도면작성 세부물량산출 <ul style="list-style-type: none"> 공종별 세부설계 최종공사비 산출 	· 상세물량 기반

이와 같은 추진절차 중 현장조사 이후의 단계에서는 공종별로 물량을 산출하여 공사비를 계산하기 때문에 개략공사비 모델의 효용성이 떨어지게 된다. 그러므로 개략공사비 모델의 효용성은 단위길이당 공사비를 통해 총 공사비를 개략적으로 산출하는 기획단계 및 현장조사 이전의 설계 초기단계에서 높게 나타날 수 있다.

한편 각 단계가 진행됨에 따라 의사결정자가 획득할 수 있는 정보의 수준이 달라진다. 기획단계에서는 대상 사업의 규모나 사업특성, 개략적인 입지 정도의 정보 외에는 파악할 수 있는 정보가 없지만, 노선선정, 현장조사 등 단계가 진행됨에 따라 획득 가능한 정보의 양과 질이 향상되게 된다. Liu와 Zhu(2007), 박종현(2001) 등이 언급한 바와 같이, 이러한 단계 진행에 따라 달라지는 정보의 수준을 반영하는 것이 공사비 예측 모형의 실무적 활용성 및 정확성을 극대화할 수 있으며, 신속한 의사결정을 위한 의사결정자의 요구에 부합되는 사항이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이상과 같은 사항을 종합하여, 그림1과 같은 2단계 개략공사비 산정체계를 도출하였다.

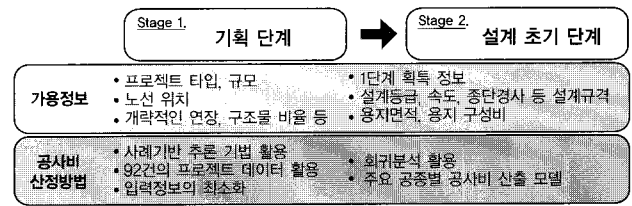


그림 1. 2단계 개략공사비 산정체계

본 연구는 사업 초기단계를 크게 2단계로 구분하여, 실시설계가 수행되기 이전 단계인 기획단계와 초기 설계단계를 적용범위로 정의한다. 또한 도로는 설계등급에 따라 선형 및 구조물 구간 비율을 달리하고 소요되는 비용의 수준에도 큰 차이가 있기 때문에 본 연구는 일반국도를 대상으로 개략공사비 산정모형을 구축하기로 한다. 1단계는 기획단계를 대상으로 하여 프로젝트 유형, 규모, 노선 위치 등과 같은 초기단계의 정보를 활용하며, 이러한 초기단계에서는 기존 데이터베이스를 활용하여 유사 프로젝트를 통해 공사비를 산정하는 사례기반추론기법을 활용한다. 2단계는 설계초기의 노선선정과정에서 주로 활용하기 위한 목적을 갖는다. 이를 위해 설계등급이나 속도, 용지면적, 구성비 등과 같이 1단계에 비해 보다 상세한 수준의 정보를 활용하여 회귀모형을 통해 세부 공종별 공사비를 산출하는 모델을 도출한다.

4. 기획단계 공사비 예측모형의 구축

본 연구가 설정한 기획단계에서는 해당 사업의 설계도면이 없기 때문에 물량정보를 획득할 수 없고 공사 개요적인 요인과 시설 제원을 비롯한 설계기준과 관련된 정보만이 획득가능하다. 또한 실측도, 지질자료 등과 같은 현지답사 및 지질조사의 결과물도 이 단계에서는 구할 수 없기 때문에 사용자가 물량을 직접 입력하는 방식도 가능하지 않다. 따라서 본 연구는 완성된 실시설계내역 자료를 수집하여 데이터베이스화하고, 이 중 기획단계에서 가용한 정보만을 역으로 선별하여 사례기반추론(Case-Based Reasoning, CBR)을 활용하는 방식으로 공사비를 예측하고자 한다. 최종적으로 AACE(Association for the Advancement of Cost Engineering)의 정확도 기준인 하한선 -30%에서 -15%의 오차율, 상한선 +20에서 +50%의 오차율을 만족시키는 모형을 제시하고자 한다.

4.1 공사비 자료 수집

본 연구에서는 가장 사례기반추론을 활용한 도로사업 공사비 예측모형을 개발하기 위하여 조달청의 국가종합전자조달시스템

에 공개된 92개의 도로사업 자료를 수집하였다. 이 자료는 2005년에서 2006년까지 발주된 사업으로 모두 100억 원 이상의 사업이며 구체적인 특성은 그림 2와 같다.

그림 2에서 볼 수 있는 총공사비와 단위길이 당 공사비를 제외한 9가지 특성은 모두 공사비 영향인자로, 문헌조사를 통해 도출된 인자들 중에서 기획단계에 획득이 가능한 인자를 선별하고 설계 전문가의 자문을 통해 검증된 특성이다. 해당 사업이 수행된 지역, 공사유형, 계약형태, 공기, 도로연장, 도로폭, 교량연장, 지하도연장, 터널연장 등이 이러한 공사비에 영향을 미치는 특성들이며, 총공사비는 본 연구의 예측 목표값으로, 단위길이 당 공사비는 최종 예측을 위한 중간단계의 값으로 활용된다.

4.2 공사비 예측모형 개발을 위한 방법론

4.2.1 사례기반추론

사례기반추론은 인간의 추론과정에 대한 인지과학 분야의 연구결과에 기초한 것으로 인간이 사고하는 과정에서 실제로는 엄밀한 논리를 사용하지 않는다는 점에 기본적인 정당성을 두고 있으며 1990년 대 초부터 금융, 보험, 의료, 첨단기술, 설계 등 여러 분야에서 다방면으로 활용되고 있다(Riesbeck과 Schank 1989, Schank 외 1994).

사례기반추론은 검색(retrieve), 재사용(reuse), 수정(revise), 유지(retain)의 절차에 따라 문제를 해결하게 된다. 과거 사례를 검색하는 방법은 문제를 정의하고 지표(index)를 설정하는 방법에 달려 있으며 일반적으로 귀납적 추출방법(inductive retrieval)과 최근접 추출방법(nearest-neighbor retrieval)이 널리 사용되고 있다(Watson, 1997). 전자는 데이터 자체에서 귀

납적 알고리즘을 이용하여 사례를 트리형태로 분류하는 방법이다. 각 사례의 결과를 가장 잘 변별할 수 있는 특성을 기준으로 계층적으로 사례를 분류해 놓으면 사례의 탐색속도가 우수하고 자동적이며 객관적인 사례 검색이 가능하다. 후자는 각각의 기존 사례가 지표를 나타내는 축으로 구성된 n-차원의 그래프 위에 표시 되고, 새로운 사례가 추가되면 각 지표에 대한 거리를 기존 사례와 비교함으로써 유사도(X_n)를 계산하고, 이를 가중치(W_n)로 보정하여 유사성 척도를 계산하는 방법으로, 특정 문제를 해결하는 데 집중할 필요가 없고 기존 사례가 적을 경우에 유용하다(곽수남, 2007).

본 연구에서는 유사사례 검색을 위하여 최근접 추출방법을 적용하였다. 수집된 도로사업 사례의 수가 약 90건 정도로 비교적 적어 기존 사례와 신규 사례를 직접 비교하는 방식이 더 적합하기 때문이다.

4.2.2 가중 사례기반추론

도로사업의 경우 하나의 유사사례만으로 공사비를 예측하는데 한계가 있다. 공사개요적인 인자 이외에도 공사비에 큰 영향을 미칠 수 있는 요인이 다양하게 존재하기 때문이다. 예를 들어 연장 및 설계등급이 일치하더라도 구조물 구간의 비율이 증가할수록 총공사비는 급격하게 증가하게 된다. 만약 사업 대상 지역에 연약지반의 면적이 넓게 분포할 경우 지반개량을 하는 데 역시 많은 비용이 투입되어야 하기 때문에 공사비가 크게 증가하게 된다. 따라서 하나의 기존 사례만으로 공사비를 예측하는 방법을 택할 경우, 기존 사례의 데이터베이스에서 완전히 동일한 유사사례를 검색하지 못 한다면 오차는 크게 증폭된다.

본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위하여 다수의 사례를 검색

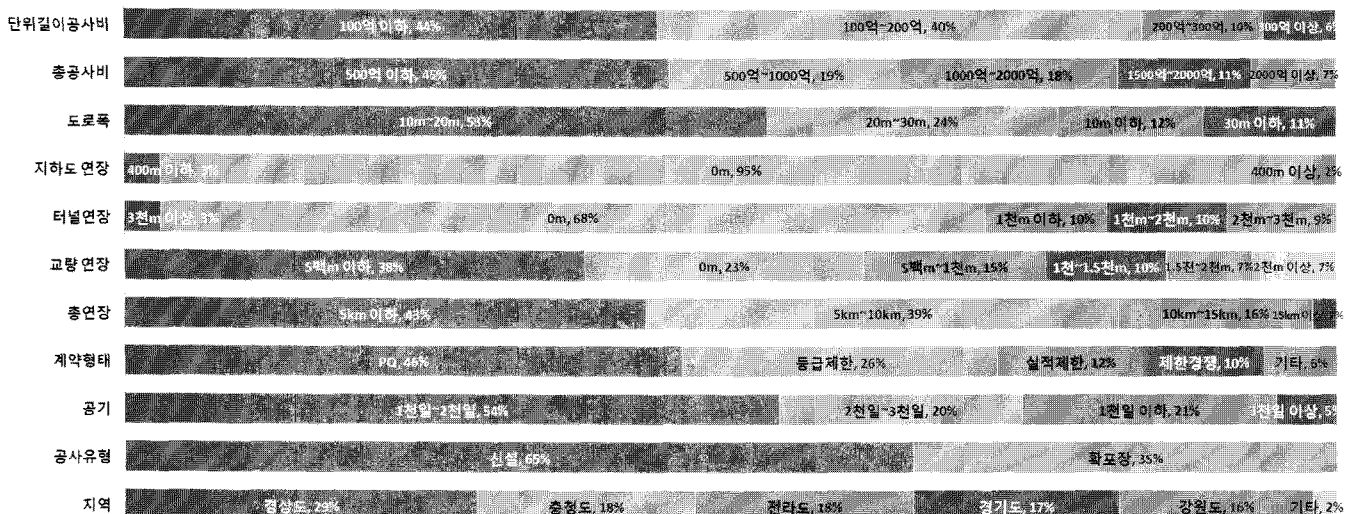


그림 2. 기획단계 공사비 자료 특성

하고 이를 가중평균한 결과로 공사비를 예측하는 체계를 제시하였다. 이는 기존의 연구들이 한 개의 사례를 사용하거나 여러 개의 유사사례를 산술평균하는 방식에 비해 예측의 정확도를 높이고 오차율을 줄일 수 있는 장점이 있다. 가중 사례기반추론의 절차는 다음과 같다.

첫째, 최근접 추출방법을 통해 신규 사례에 대해 기존 사례의 유사도 점수를 계산하고, 일정 순위 안에 진입하는 기존 사례를 수집한다. 둘째, 유사도 점수에 기초하여 각 유사 사례에 가중치를 부여하는데, 이때 식(1)을 활용하여 차등 가중치를 부여한다. 마지막으로, 수집된 유사사례의 가중치와 공사비를 이용하여 신규사례의 공사비를 식(2)를 통하여 산출한다.

$$W_i = \frac{SS_i}{\sum_{i=1}^n SS_i} \quad (1)$$

여기서, W_i = i번째 사례의 가중치
 SS_i = i번째 사례의 유사도 점수
 n = 수집된 유사사례의 개수

$$Re_n = \sum_{i=1}^n W_i \times Re_i \quad (2)$$

여기서, Re_n = 예측대상사례의 공사비
 Re_i = i번째 사례의 공사비

4.3 공사비 영향인자의 가중치 설정

가중 사례기반추론에 사용된 9개 특성지표 (표 4 참조)의 가중치를 설정하기 위하여 본 연구에서는 선형계획법을 사용하였다. 공사비 예측모형은 1차 부등식 형태의 목적함수와 제약조건을 식(3)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \text{목적함수 : } & \text{Min. } \sum_{n=1}^N \frac{ER_n}{N} \\ & \frac{|PC_n - TC_n|}{TC_n} \\ & = \sum_{n=1}^N \frac{TC_n}{N} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{제약조건 : } w_i \geq 0, \sum_{i=1}^n w_i = 1$$

여기서, ER_n = n번째 예측사례의 오차율
 PC_n = n번째 예측사례의 예측값
 TC_n = n번째 예측사례의 실제 공사비
 w_i = i번째 지표의 가중치
 N = 예측대상사례의 건수

유사사례의 예측값을 구하기 위해 다음 절차가 활용된다. 첫째, 각 지표의 가중치와 유사도 점수를 활용해 n번째 사례의 유사도 점수를 식(4)를 통해 구한다. 이때 각 지표의 유사도 점수는 문자열의 경우 예측대상사례와 정확히 일치할 경우 100점을, 그렇지 않을 경우 0점을 부여하게 된다. 속성값이 수치일 때, 오차율이 일정 범위 안에 들어올 경우에만 점수를 부여하는 방식을 활용하는데, 일반적으로 10%가 기준이 된다(김광희 및 강경인 2004, 김재엽 등 2006).

$$SS_n = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times SSC_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \times 100 \quad (4)$$

여기서, SS_n = n번째 기존사례의 유사도 점수
 SSC_i = i번째 지표의 유사도 점수

유사도 점수가 높은 3개의 기존사례를 선택한 뒤 식(5)에 따라 가중평균을 하여 단위길이 당 공사비를 예측하고, 최종적으로 예측하고자 하는 사례의 연장을 곱하여 총공사비를 구한다.

$$PUC_n = \sum_{s=1}^3 \frac{SI_s}{SS_1 + SS_2 + SS_3} \times UC_s \quad (5)$$

여기서, PUC_n = n번째 예측사례의 단위길이 당 공사비 예측값

UC_s = s번째 검색된 사례의 단위길이 당 공사비

$$PC_n = PUC_n \times TL_n \quad (6)$$

여기서, TL_n = n번째 예측사례의 도로 연장

선형계획법에 따라 PC_n 가 제약조건 식(3)을 만족시키는 동시에 최소의 오차율을 갖는 지표의 가중치를 Microsoft Excel Solver를 사용하여 구하였으며, 그 결과는 표4와 같다.

표 4. 가중사례기반추론 특성지표의 가중치

지역	공사유형	입찰방식	공기	도로연장
0.026	0.204	0.098	0.156	0.025
도로폭	교량연장	지하도연장	터널연장	-
0.139	0.114	0.11	0.128	-

4.4 기획단계 공사비 예측모형 검증

기획단계 도로사업 공사비 예측모형 개발결과를 검증하기 위하여, 표4의 가중치를 바탕으로 92건의 사례 데이터베이스를 활

용하여 10건의 추가 프로젝트에 대해 예측공사비와 실제값 간의 비교를 통한 검증 실시하였다. 본 연구에서 제시한 기획단계 모형으로 공사비를 예측하고 상대적 정확성을 비교하기 위하여 국토해양부와 한국개발연구원 기준에 따른 비교결과를 동시에 제시하였다.

오차율 평균을 산출해본 결과, 표5에서와 같이 국토해양부와 한국개발연구원 기준은 각각 47.8%, 43.5%의 평균오차율을 보이고 있는데 반하여, 본 연구의 기획단계 모형은 평균 19.7%로 나타나 상대적으로 개선된 정확도를 보이고 있다. 오차의 표준편차 측면에서도 현행 기준을 적용할 경우 최대 121.8%까지 편차가 벌어지는 반면, 본 연구 모형의 경우 18.4%의 비교적 안정된 예측편차를 보이고 있다. 또한 일부 사례의 경우 현행 기준 적용 시, 예측된 공사비가 150% 이상까지 상한오차가 발생하는 등 기준 적용 시의 문제점을 확인할 수 있었다. 한편 미국의 비용 전문가 협회(American Association of Cost Engineers: AACE)에서는 공공공사의 경우 기획단계 공사비 예측의 오차율 상한값과 하한값을 각각 +20%~+50%, -15%~-30%로 제시하고 있는데, 본 연구 모형은 이러한 오차율 기준을 만족시키는 결과를 보이고 있다.

표 5. 모형별 예측값 비교

구분	예측 오차율	오차율 표준편차
국토해양부	47.80%	121.80%
KDI	43.50%	84.50%
본 연구모형	19.70%	18.40%

5. 초기 설계단계 공사비 예측모형 구축

앞서 살펴본 바와 같이, 현재 기획단계는 오차가 많이 발생하고 있기는 하지만 정부에서 제시한 통일된 기준이 있다. 그러나 초기설계, 특히 노선선정 단계에서는 개략공사비를 산정하는 국가기준이 부재하여 기획단계 모형을 그대로 활용하거나 전문가의 판단에 의존하여 공사비 산정이 이루어지고 있는 실정이다. 설계회사별로 개략공사비를 산정하는 기준이 존재하지만 토공 물량은 견적 전문가의 경험과 직관에 의존하여 개략공사비를 산정하고 있어 예측의 일관성이 낮고 과학적으로 검증이 불가능하다. 한편 도로설계단계는 노선을 선정하는 데 많은 시간이 소요되며, 대표적인 물량정보를 바탕으로 노선대안의 최적이안 또는 비교안의 경제성 평가를 허용된 오차범위 내에서 신속하게 해줄 수 있는 공사비 예측모형도 현재로서는 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서 대표공종의 물량을 활용하여 AACE의 정확도 기준인 하한선 -20%에서 -10%의 오차율, 상한선 +10에서 +30%의 오

차율을 만족시키는 동시에 기획단계보다 더 낮은 오차율을 실현하는 설계초기단계 모형을 개발하고자 한다.

5.1 공사비 자료의 수집 및 변환

본 연구에서는 설계단계 도로사업 개략공사비 산정모형을 구축하기 위하여 국내 6대 지방국토관리청에서 최근 10년간 수행한 51건의 실시설계내역 자료를 수집하였다(그림3). 도로성능, 용량, 규모와 같은 시설물의 기초제원에 따라 설계기준이 다르고, 그에 따라 공사비 영향인자에 변동이 있기 때문에 이같은 요인을 배제하기 위하여 일반국도를 대상으로 자료를 수집하였다. 대상 지역은 충청도에서 제주도까지 다양하게 분포하며, 공사유형은 확포장이 64%, 신설이 36%로 구성되어 있다. 차선의 수는 4차선 88%, 2차선 12%의 비율을 보이며, 도로의 연장은 최소 5.1km에서 최대 15.7km까지로 5km~10km가 64%, 10km~15km가 32%, 15km 이상이 4%의 비율로 분포되어 있다. 총공사비는 최소 389억 원에서 최대 4,271억 원까지 분포되어 있고 단위길이 당 공사비로 나타낼 경우 100억~200억 원이 52%, 100억 원 이하가 28%, 200억~300억 원이 20%의 비율로 구성되어 있다.

수집된 자료의 내역서 분석을 수행한 결과 총 5,479건의 공종이 존재하는 것으로 나타났다(표 6). 포장공의 동상방지층 포설 및 다짐과 같은 공종의 경우 포장두께에 따라 공종의 수가 늘어나게 되어 많은 수의 공종이 존재하게 된다. 이러한 원시데이터를 그대로 사용하여 이 공종의 공사비에 대한 영향도를 분석하게 될 경우 포장두께에 따라 영향도가 분산되기 때문에 공종의 영향도가 낮게 평가될 수 있어 지나치게 세분화된 공종을 통합할 필요성이 있다. 따라서 국토해양부(2005)의 '국도건설공사 설계실무요령'에 정의된 필수 공종과 그 규격에 따라 수집된 내역서를 통합하는 작업을 수행한 결과, 총 512개 공종으로 압축할 수 있었다.

표 6. 수집된 내역서의 공종수 분석결과

공종	기존 내역서			통합 내역서 공종수
	공종수	최대값	최소값	
계	5,479	728	253	512
공동공사	87	49	26	-
토공	240	57	33	74
비탈면안전공	471	58	2	-
배수공	1,905	261	71	191
포장공	476	148	27	85
교통안전시설공	574	78	29	71
부대공	1,535	207	17	91
기타	191	51	3	-

한편, 공사비는 물량뿐만 아니라 단가에도 영향을 받기 때문에 물가상승에 의한 단가의 변동에 따른 공사비 변동 요인을 제거시킬 필요가 있다. 따라서 한국건설기술연구원에서 매월 발표하는 건설공사비지수를 활용하여 2007년 1월 기준으로 수집된 자료의 단가를 변환시켜 설계시점 차이로 인한 공사비 변동을 상쇄시켰다.

5.2 대표공종의 도출

통합된 내역서를 기반으로 초기설계단계 개략공사비 모델에 포함될 대표공종은 다음과 같은 과정을 따라 도출되었다. 첫째, 대표공종 후보군의 물량을 산출한다. 예를 들어, 다양한 공종과 규격이 존재하는 측구공의 경우 모든 물량을 합산하여 대표공종 후보군의 물량을 산출한다. 즉 L형 측구의 모든 규격, V형 측구의 모든 규격 등 측구공 하위 공종의 규격별 물량을 모두 더한다. 둘째, 상관관계 분석을 수행하여 대표공종 후보군의 물량이 변할 때 상위 대공종(예를 들어, 흙짜기의 경우 토공, 측구공의 경우 배수공) 공사비에 대한 영향도를 분석하여 대표공종 후보군을 압축한다. 셋째, 압축된 후보군이 대공종에 포함된 빈도를 분석하여 수집된 전체 사례에서 50% 이상이 포함된 공종만을 대표공종으로 선별한다. 각 공종별로 다양한 규격 기준의 내역 아이템이 존재하기 때문에 여러 사례에서 공통적으로 사용되는 내역 아이템을 대표공종으로 선정하기 위해 50%라는 기준을 설정하였다. 마지막으로 각 공종이 대공종에서 차지하는 공사비 비중을 분석하여 1%가 넘는 공종만 남긴다. 그리고 상관관계 분석결과 영향도가 낮더라도 공사비 비중이 크거나 빈도가 50% 이하라도 공사비 비중이 높은 경우는 예외적으로 대표공종에 추가한다. 표7은 이와 같은 과정을 통해 도출된 대표공종 결과이다.

표 7. 대표공종 도출 결과

	구분	단위	상관관계	빈도비율	금액비중
토 공	흙짜기	m ²	0.575(**)	100%	39.7%
	유용토 운반	m ²	0.644(**)	100%	23.9%
	순쌓기 운반	m ²	0.363(**)	47%	21.0%
	사토	m ²	0.039	34%	6.3%
	흙쌓기	m ²	0.835(**)	100%	9.4%
배 수 공	배수 토공	m ²	0.622(**)	94%	8.1%
	측구공	m	0.713(**)	100%	18.0%
	맹암거	m	0.448(**)	100%	1.1%
	횡배수관공	m	0.428(*)	94%	4.70%
	종배수관	m	0.255	97%	2.5%
	임거공	m ²	0.583(**)	91%	13.5%
	도수로공	m ²	0.577(**)	94%	2.5%
포 장 공	용수개거	m ²	0.360(*)	82%	4.2%
	동상층포설및다짐	m ²	0.436(*)	89%	4.1%
	보조층포설및다짐	m ²	0.392(*)	100%	3.2%
	Conc.포설및양생	m ²	0.422(*)	89%	1.7%
	아스콘 중간층	m ²	0.479(**)	89%	1.2%
	아스콘 기층	m ²	0.361	97%	2.3%
	아스콘 표층	m ²	0.724(**)	97%	1.
교 통 공	교통표지판	개	0.634(**)	71%	1.1%
	시선유도표지	개	0.610(**)	74%	2.2%
	노면표시	m ²	0.640(**)	74%	4.2%
	가드레일	경간	0.641(**)	74%	22.7%
	가드웬스	m	0.211	41%	2.2%

(*) : 신뢰도 0.05에서 유의 ; (**) : 신뢰도 0.01에서 유의

이상의 과정에 따라 토공의 경우 당초 17개의 대표공종 후보군이 5개의 대표공종으로 압축되었고, 배수공은 8개로, 포장공은 6개로, 교통안전시설공은 5개로 압축되었다. 토공의 대표공종에는 예외적인 경우가 인정되었는데 순쌓기 운반, 사토의 빈도 비율이 50% 이하였으나 두 공종은 한 사례에 동시에 존재하는 경우가 드물기 때문에 공사비 금액비중을 고려하여 대표공종에 포함하였다. 한편 표7에서 제외된 부대공은 28개의 대표공종 후보군이 존재한다. 하지만 상관관계 분석결과 도로안내 표지판과 지장가옥철거만이 각각 0.424와 0.535의 상관계수를 보였을 뿐,

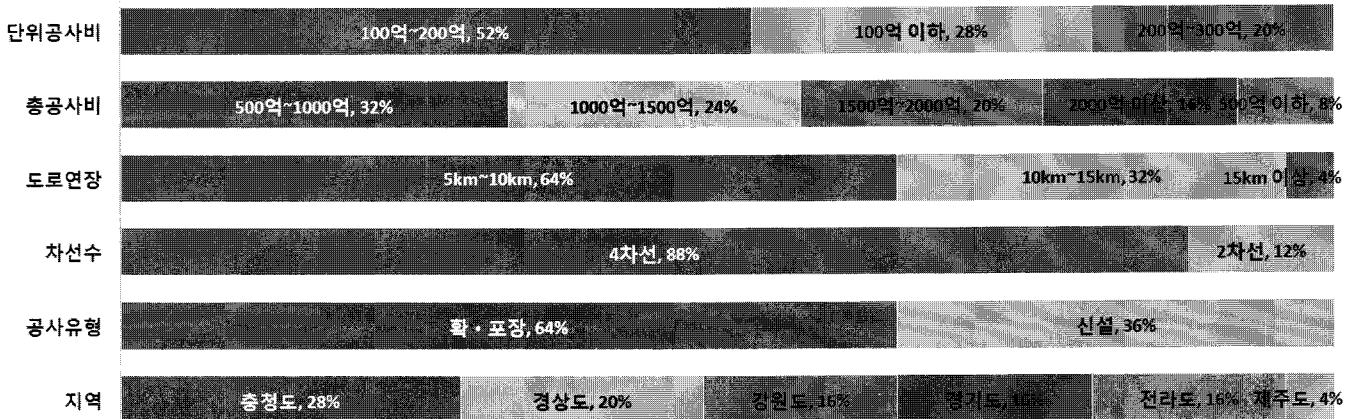


그림 3. 기획단계 공사비 자료 특성

나머지 공종은 공사비에 큰 영향을 미치지 않는다는 결론이 도출되었다. 이는 부대공은 사업고유의 특성에 따라 추가되는 경우가 많아 통합 내역서 작성법에 따라 통합되는 공종이 드물기 때문인 것으로 보인다. 따라서 부대공은 다른 공종의 공사비에 비례한다는 전제 하에 부대공 공사비를 예측하는 모형을 제시한다.

5.3 공사비 예측모형 개발을 위한 방법론

도로사업 설계단계 공사비 예측모형 개발을 위하여 본 연구에서는 회귀분석을 활용하였다. 다중회귀분석을 활용하여 독립변수(independent variable)인 대표공종을 통해 종속변수(dependent variable)인 대공종 공사비를 예측하고자 한다. 또한 대표공종 이외에도 공사개요 및 설계기준과 같은 공사비 영향인자를 독립변수로 활용하였다(표8 참조).

이상의 공사비 영향인자는 기획단계 공사비 예측모형에 사용된 인자들과 동일한 방식으로 도출되었다. 다중회귀분석을 수행하는 과정에서는 모형의 선택문제(model selection problem)가 주요하게 작용하는데 본 연구에서는 단계별 선택법(stepwise method)을 적용하여 회귀방정식을 도출하였다. 이때 설정된 F-진입값(F-to-Enter)과 F-제거값(F-to-Remove)은 기존 연구의 결과에 따라 각각 0.15와 0.30을 적용하였다(이군희, 2003).

표 8. 초기설계단계 도로사업 공사비 영향인자

공사비 영향인자	특성	
공사개요	발주처	XX 지방국토관리청
	지역구분	도시/지방
	도로구분	고속도로/일반도로/지방도
	설계기간	XX 일
	공사유형	신설/확·포장
	예정가격 작성방법	원가계산/실적공사비
	차선수	왕복 XX 차선
	구조물 비율	교량 : XX % 터널 : XX %
설계기준	설계등급	국도/국도II/국도III
	설계속도	XX km/hr
	도로폭원	XX m
	평면곡선반경	XX m
	최대종단경사	XX %
	적용물가년도	200 XX 년 XX 월
	건설공사비지수	XX

회귀방정식 도출에 앞서 공사비 예측의 신뢰도를 향상시키기 위하여 이상값을 제거하는 과정을 거쳤다. 자료의 상한값 또는 하한값으로 인하여 공사비의 분포가 극단의 영역으로 치우칠 수가 있고 이는 예측의 정확도를 저하시키기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 BestFit 4.5를 활용하여 카이-스퀘어 검증으로 확률 분포를 설정한 뒤 신뢰구간 밖의 공사비 자료는 제거하고 나머지

데이터만으로 공사비 예측모형을 구축하였으며 신뢰구간은 90%로 설정하였다.

5.4 대공종별 공사비 예측모형 구축

5.4.1 토공 공사비 예측모형

BestFit을 활용한 분석결과(표9) 토공의 공사비는 최대 324.7억 원에서 최소 20.4억 원의 구간에 로그정규분포(Log-normal distribution)를 이루어 분포하고 있으며 평균 145.7억 원, 표준편차 105.5억 원이다. 90%의 신뢰구간을 벗어나는, 즉 상한값 345.1억 원, 하한값 31.6억 원을 벗어나는 값을 제거하고 회귀식 모델링 분석을 수행하였다.

회귀방정식의 설명력을 나타내는 R²값은 일반적으로 0.4 이상이면 통계적으로 의미가 있고, 0.5 이상이면 높은 수준이며, 0.7 이상이면 매우 높다고 판단하는데(안광호, 2005), 토공의 R²값 0.900으로 0.7을 초과하여 매우 설명력이 높은 것으로 드러났다. 또한 일반적으로 더빈-왓슨(Durbin-Watson) 통계량이 1.5~2.5의 값을 가질 때 다중공선성 문제가 없다고 볼 수 있는데(안광호, 2005) 토공의 더빈-왓슨 통계량은 1.764여서 다중공선성 문제 역시 발생하지 않았다고 볼 수 있다. 마지막으로 유의확률은 일반적으로 0.05보다 작을 경우 회귀계수의 유의성이 확보되었다고 할 수 있고 이때 회귀방정식은 95%의 신뢰구간에서 유의성을 가짐을 의미하는데 토공의 경우 유의확률 0.003으로써 회귀계수의 유의성이 확보된 것으로 나타났다.

표 9. 토공 공사비 분포 및 회귀분석 결과

평균	표준편차	최대값	최소값	분포형태
145.69	10.547	324.67	20.37	로그정규분포
R	R ²	수정된 R ²	Durbin-Watson	유의확률
0.949	0.9	0.751	1.764	0.003

토공의 공사비 예측모형은 표 10의 식(7)과 같다. 대표공종 중에서 흙깎기, 흙쌓기, 유용토운반이 독립변수로서 진입하였고, 차선수, 터널비율, 설계등급, 설계속도, 도로폭, 평면곡선반경, 최대종단경사 등 공사개요 및 설계기준과 관련된 요인도 모델식에 진입하였다. 이는 도로의 종단구배 및 평면선형과 도로횡단면 구성 등이 토공 공사비에 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다.

5.4.2 배수공 공사비 예측모형

BestFit을 활용한 분석결과(표11) 배수공의 공사비는 최대 179.3억 원에서 최소 9.2억 원의 구간에 정규분포(normal distribution)를 이루고 분포하고 있으며 평균 81.8억 원, 표준편

차 44.6억 원이다. 90%의 신뢰구간을 벗어나는, 즉 상한값 155.2억 원, 하한값 8.3억 원을 벗어나는 값을 제거하고 분석을 수행하였다. R²값은 0.891로써 토공과 마찬가지로 매우 설명력이 높았으며 다중공선성 문제 또한 발생하지 않았고 유의확률도 0.000으로 매우 낮은 값을 보였다.

배수공의 공사비 예측모형은 표 10의 식(8)과 같다. 대표공종으로 도출되었던 맨암거, 화배수관, 종배수관은 공사비 규모가 작아서 변수로 진입하지 못한 것으로 보이며 나머지 대표공종은 모두 독립변수로 진입하였다. 배수공 역시 다양한 공사개요 및 설계기준 요인이 공사비에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 차선수에 대하여 강한 양의 상관관계를 보인다는 점은 도로의 폭이 증가할수록 처리해야할 배수량이 증가하여 공사비가 늘어난다는 것을 의미한다. 또한 건설공사비지수의 변수 진입은 배수공은 물가변동에 민감하게 반응하는 공종임을 의미한다.

표 11. 배수공 공사비 분포 및 회귀분석 결과

(단위: 억 원)

평균	표준편차	최대값	최소값	분포형태
81.75	44.63	179.33	9.15	정규분포
R	R ²	수정된 R ²	Durbin-Watson	유의확률
0.944	0.891	0.808	1.593	0.000

5.4.3 포장공 공사비 예측모형

BestFit을 활용한 분석결과(표12) 포장공의 공사비는 최대 207.4억 원에서 최소 21.5억 원의 구간에 로그정규분포를 이루고 분포하고 있으며 평균 80.0억 원, 표준편차 42.7억 원이다. 90%의 신뢰구간을 벗어나는, 즉 상한값 158.9억 원, 하한값 22.5억 원을 벗어나는 값을 제거하고 분석을 수행하였다. 포장공은 여타 공종에 비하여 지형이나 기상조건에 영향을 받지 않고 기하학적으로 정형화된 형태가 존재하기 때문에 예측모형의 정확도가 가장 높게 나타났다. R²값은 0.981로써 매우 높은 값을 가졌고 독립변수간의 독립성 및 유의확률 또한 높게 나타났다.

표 10. 대공종별 회귀방정식

대공종	회귀방정식	
토 공	$-5.47 \times 10^9 + 3.544 \times \text{흙깎기}(m^3) - 2.893 \times \text{유용토운반}(m^3) + 8.452 \times \text{흙쌓기}(m^3) + 6.76 \times 10^7 \times \text{차선수}(2,4,6차선)$ $-1.76 \times 10^8 \times \text{타널비율}(\%) + 2.16 \times 10^8 \times \text{설계등급}(1,2,3등급) - 6.29 \times 10^8 \times \text{설계속도}(km/hr) - 1.82 \times 10^8 \times \text{도로폭}(m)$ $- 8.41 \times 10^8 \times \text{평면곡선반경}(m) + 2.39 \times 10^8 \times \text{최대종단경사}(\%)$	(7)
배수공	$-1.40 \times 10^{10} + 42.855 \times \text{배수토공}(m^3) - 150.153 \times \text{측구공}(m) + 182.753 \times \text{암거공}(m^3) - 2.382,044 \times \text{노수로공}(m)$ $+ 338,392 \times \text{용수개개}(m^3) + 6.60 \times 10^8 \times \text{차선수}(2,4,6차선) - 6.12 \times 10^8 \times \text{도로연장}(km) - 1.10 \times 10^8 \times \text{교량비율}(\%)$ $- 7.98 \times 10^7 \times \text{타널비율}(\%) - 1.59 \times 10^8 \times \text{도로폭}(m) - 7.19 \times 10^7 \times \text{건설공사비지수}$	(8)
포장공	$-2.77 \times 10^8 + 1.633 \times \text{동상방지층}(m^2) - 2.170 \times \text{보조기층}(m^2) + 182.429 \times \text{콘크리트}(m^2) + 57.736 \times \text{아스콘기층}(m^2)$ $- 11,805 \times \text{아스콘표층}(m^2) - 1.16 \times 10^8 \times \text{도로연장}(km) + 1.87 \times 10^8 \times \text{도로연장}(2차선, km) - 1.73 \times 10^8 \times \text{도로연장}(4차선, km)$	(9)
교통공	$-1.14 \times 10^8 + 2.832,837 \times \text{교통표지판}(개) - 985,015 \times \text{시선유도표시}(개) + 34,657 \times \text{노면표시}(m^2) + 2.96 \times 10^8 \times \text{설계등급}(1,2,3등급)$ $+ 4.39 \times 10^7 \times \text{도로폭}(m) - 9.77 \times 10^8 \times \text{평면곡선반경}(m)$	(10)
부대공	$1.63 \times 10^9 - 0.033 \times \text{토공 공사비}(원) + 0.010 \times \text{배수공 공사비}(원) + 0.088 \times \text{포장공 공사비}(원) - 0.247 \times \text{교통공공사비}(원)$ $- 7.39 \times 10^8 \times \text{차선수}(2,4,6차선) + 8.59 \times 10^7 \times \text{교량비율}(\%) - 8.18 \times 10^7 \times \text{타널비율}(\%) + 1.79 \times 10^8 \times \text{도로연장}(km)$ $+ 1.92 \times 10^8 \times \text{도로폭}(km) - 9.54 \times 10^7 \times \text{설계속도}(km/hr) - 1.48 \times 10^8 \times \text{건설공사비지수}$	(11)

표 12. 포장공 공사비 분포

(단위: 억 원)

평균	표준편차	최대값	최소값	분포형태
78.99	42.67	207.41	21.51	로그정규분포
R	R ²	수정된 R ²	Durbin-Watson	유의확률
0.991	0.981	0.971	1.681	0.000

포장공 공사비 예측모형은 표 10의 식(9)와 같다. 아스콘 중간층은 변수에서 제외되었는데 그 이유는 아스콘 기층과의 높은 상관관계 때문이다. 특수한 경우를 제외하고 아스콘 중간층은 기층과 함께 포설되기 때문에 두 대표공종의 상관관계가 0.770으로 매우 높은 값을 갖는다. 따라서 회귀방정식에 아스콘 기층이 진입함에 따라 아스콘 중간층은 제외되었다. 도로의 면적과 관련이 있는 요인을 제외하고는 공사개요 및 설계기준 요인이 변수로 진입하지 않았다는 점 역시 포장공이 매우 정형화되어 있는 공종임을 의미한다.

5.4.4 교통안전시설공 공사비 예측모형

BestFit을 활용한 분석결과(표13) 교통안전시설공의 공사비는 최대 78.1억 원에서 최소 1.3억 원의 구간에 로그정규분포를 이루고 분포하고 있으며 평균 20.4억 원, 표준편차 13.3억 원이다. 90%의 신뢰구간을 벗어나는, 즉 상한값 4.53억 원, 하한값 3.83억 원을 벗어나는 값을 제거하고 분석을 수행하였다.

표 13. 교통안전시설공 공사비 분포

(단위: 억 원)

평균	표준편차	최대값	최소값	분포형태
20.37	13.28	78.13	1.29	로그정규분포
R	R ²	수정된 R ²	Durbin-Watson	유의확률
0.867	0.751	0.626	2.534	0.001

교통안전시설공은 포장면 위에 시공되지만 포장공과 달리 정형화되기 어렵고 공사개요 및 설계조건에 주로 영향을 받으므로 상대적으로 낮은 설명력을 보였으나 통계적으로는 유의한 결과가 도출되었다. 교통안전시설공의 공사비 예측모형은 표 10의 식

(10)과 같다. 이 공종은 특히 설계등급과 강한 양의 상관관계를 보였는데 설계등급이 높아질수록 안전 대비책과 관련된 공종이 증가하게 되어 발생된 결과로 보인다.

5.4.5 부대공 공사비 예측모형

BestFit을 활용한 분석결과(표14) 부대공의 공사비는 최대 163.3억 원에서 최소 11.0억 원의 구간에 로그정규분포를 이루고 분포하고 있으며 평균 55.8억 원, 표준편차 32.9억 원이다. 90%의 신뢰구간을 벗어나는, 즉 상한값 117.9억 원, 하한값 16.0억 원을 벗어나는 값을 제거하고 분석을 수행하였다.

부대공은 대표공종이 도출되지 않았기 때문에 다른 대공종 공사비에 영향을 받는다는 가정 하에 토공, 배수공, 포장공, 교통안전시설공 공사비와 공사개요, 설계기준 등 공사 영향인자를 독립변수로 설정하고 회귀분석을 실시하였으며 그 결과는 표 14와 같다.

표 14. 부대공 공사비 분포

(단위: 억 원)				
평균	표준편차	최대값	최소값	분포형태
55.81	32.9	163.3	10.97	로그정규분포
R	R ²	수정된 R ²	Durbin-Watson	유의확률
0.851	0.724	0.172	2.397	0.038

R²값은 0.724로서 설명력 및 다중공선성 측면에서 양호한 결과를 보였지만 유의확률이 다소 높게 나타났다. 이는 부대공 공사비는 사업 고유의 특성에 기인하기 때문에 발생한 결과로 보인다. 부대공 공사비 예측모형은 표 10의 식(11)과 같다. 토공, 배수공, 포장공, 교통안전시설공의 대공종 공사비가 변수로 진입했으며 공사개요 및 설계조건 역시 부대공 공사비에 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

표 15. 검증대상사례의 개요

구분	사례A	사례B	사례C	사례D	사례E
공사유형	확포장	확포장	신설	확포장	확포장
차선수	4	4	4	4	4
도로연장(km)	8.6	5.1	7.1	9.1	5.9
교량비율(%)	10.7	1.7	0.3	9	0.4
터널비율(%)	17.6	12	0	7.6	15.4
설계등급	2	2	3	1	3
설계속도(kph)	80	80	70	80	70
도로폭(m)	20	20	20	20	20
평면곡선반경(m)	280	280	200	700	420
최대중단경사(%)	4	4	6	5	6
건설공사비지수	104	119	130.8	102.9	115.8

5.5 설계단계 공사비 예측모형 검증

설계단계 도로사업 공사비 예측모형을 검증하기 위하여 모델

구축에 활용된 데이터(총 51건)의 약 10%에 해당하는 5개의 추가 사례를 수집하였다. 사용된 사례의 개요는 표15와 같다. 5건의 검증사례는 사업의 개요적인 측면에서 다양한 양상을 보인다. 도로의 연장은 5.1km에서 9.1km까지 분포하고, 사례 A의 경우 구조물 비율이 10% 이상이지만 사례 C는 교량만 0.3%의 비율로 구성되어 있을 뿐 대부분의 구간이 토공구간이다. 설계등급 역시 최고등급과 최저등급이 모두 존재하고 그 외의 요인 역시 다양하게 분포하고 있다. 차선수 및 도로폭은 4차선에 집중되었는데 국도의 특성상 4차선 사례가 대부분이기 때문이다. 한편 도출된 회귀방정식에 검증사례를 적용한 결과는 표16과 같다.

표 16. 모형의 예측결과 및 오차율

(단위: 원)				
구분	대공종	실제값	예측값	오차율
사례 A	토 공	24,718,167,957	18,542,291,638	-25.00%
	배수공	12,582,174,905	13,636,990,767	8.40%
	포장공	10,451,561,809	11,177,631,061	6.90%
	교통공	2,877,370,557	3,557,594,707	23.60%
	부대공	6,580,325,971	6,857,102,868	4.20%
사례 B	토 공	57,209,601,200	53,771,611,041	-6.00%
	토 공	14,018,354,090	11,857,618,186	-15.40%
	배수공	6,634,780,224	5,097,202,755	-23.20%
	포장공	4,848,454,914	5,197,419,072	7.20%
	교통공	2,610,105,887	1,008,448,013	-61.40%
사례 C	부대공	5,553,995,753	3,559,214,051	-35.90%
	직접비	33,665,690,867	26,719,902,077	-20.60%
	토 공	4,968,752,288	6,238,507,210	25.60%
	배수공	4,037,507,922	1,584,434,191	-60.80%
	포장공	8,784,267,570	7,903,225,845	-10.00%
사례 D	교통공	904,348,214	1,869,712,814	106.70%
	부대공	7,336,650,942	7,129,773,170	-2.80%
	직접비	26,031,526,937	24,725,653,231	-5.00%
	토 공	13,506,955,729	14,530,774,258	7.60%
	배수공	7,231,710,608	6,138,317,232	-15.10%
사례 E	포장공	14,217,834,919	10,713,295,568	-24.60%
	교통공	2,196,545,740	2,298,036,191	4.60%
	부대공	5,262,861,013	6,484,415,019	23.20%
	직접비	42,415,908,009	40,164,837,268	-5.30%
	토 공	9,316,024,412	7,444,660,303	-20.10%
사례 E	배수공	12,285,594,584	9,054,423,623	-26.30%
	포장공	6,350,218,036	5,526,490,615	-13.00%
	교통공	1,015,191,298	1,197,333,818	17.90%
	부대공	4,932,002,474	7,573,981,184	53.60%
	직접비	33,899,030,803	30,796,889,544	-9.20%

사례A의 경우 토공의 공사비가 전체 직접비의 43%까지 차지하는 사업이어서 기타 공종의 공사비가 상대적으로 적다. 토공 공사비 특성상 다소 높은 25% 정도의 큰 오차가 발생하지만 다른 공종의 경우 안정적인 예측을 보임에 따라 직접비 예측 오차는 -6.0%로 전체적으로 정확한 예측을 보이고 있다. 사례B 역시 토공의 비율이 높고, 교통안전시설공에서도 이 지역이 교통

사고 빈발지역으로서 주변 주민의 민원을 반영한 특수한 경우가 반영되어 있어 직접비 예측 오차도 다른 사례보다 크게 발생하여 -20.6%의 오차를 보인다. 그러나 이는 AACE의 오차율 하한선 -10%에서 -20%, 상한선 +10%에서 +30% 기준에 근접하는 결과로서 예측치로서 의미가 있다고 판단된다. 한편 사례 C는 직접비 오차율이 가장 낮은 것으로 나타났다. 구조물 비율이 낮아 이러한 결과를 보였으며 구조물 공사가 토공을 비롯하여 여타 공종에 직간접적으로 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

결론적으로 모든 사례가 AACE의 기준을 만족시키고 있으며 평균적으로 직접비 전체의 오차율은 -9.2%로 예측의 정확도가 높다고 할 수 있다. 본 연구에서 제시한 공사비 예측모형은 초기 설계단계에서 모든 공종에 대한 상세물량에 대한 정보를 획득할 수 없을 때, 대표적인 공종의 물량과 공사개요 정보만으로 공사비를 10% 이내 오차율에서 정확하게 예측할 수 있기 때문에 노선대안별 경제성 평가를 통한 신속한 의사결정에 활용될 수 있다.

6. 결론 및 향후 연구계획

본 연구는 기획 및 초기 설계단계에서 한정된 가용정보만으로 기존의 선형적 모형의 한계를 극복하며 AACE 기준에 부합하는 정확도를 보이는 도로사업 공사비 예측모형 개발을 목적으로 하였다. 단계별로 공사비 예측의 목적이 다르고 그에 따라 요구되는 정확도 수준도 다르기 때문에 각기 다른 방법론으로 공사비 예측모형을 개발하였으며 이를 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

첫째, 국·내외에서 사용되고 있는 공사비 예측모형을 분석하고 그 한계 및 시사점을 도출하였다. 또한 관련 연구동향을 분석하였다. 그 결과 도로사업에 내재된 다양한 공사비 관련 영향인자들을 반영할 수 있는 예측모형 개발의 필요성이 도출되었다.

둘째, 단계별 공사비 예측목적에 부합하는 결과를 보이기 위하여 AACE 기준을 오차율 목표로 설정하였다. 이 기준에 부합하기 위해서는 기획단계에는 공사개요 및 설계기준 정보만으로 공사비를 예측해야 하고, 초기 설계단계에는 대표물량을 입력 변수로 하는 공사비 예측모형을 개발해야 한다는 단계별 예측체계를 제시하였다.

셋째, 단계별 가용정보를 문헌조사를 통해 도출하고 전문가 자문을 받아 그 적절성을 검증하였다. 이렇게 도출된 가용정보를 기반으로 기획단계에는 사례기반추론을, 초기 설계단계에는 다중회귀분석을 활용하여 공사비를 예측하는 모형을 개발하였고 AACE 기준 및 현행 공사비 예측모형과 비교하여 정확도를 검증하였다.

그러나 본 연구는 설계단계 예측모형 개발에 사용된 대표공종의 물량을 구하는 방법에 대해서는 다른 기준을 제시하지 못하였으며 도로 설계전문가가 직접 사용자 입력방식으로 이를 구하도록 하는 방안을 채택하였다. 앞으로 후속 연구를 통해 본 연구에서 제시한 대표물량을 모델링 방식을 통해 간편하게 구하고 대표물량에서 제외된 공종은 일식개념으로 비율을 구하여 개략공사비를 구하는 방식을 제시하려고 한다. 또한 본 연구는 설계기준에 따른 공사비 영향인자의 차이를 배제하기 위하여 공공사업으로 실시된 일반국도사업만을 대상으로 진행되었다. 이에 따라 본 연구에서 제시된 도로사업 공사비 예측모형은 고속도로사업, 민자사업, 터키사업 등에는 적용할 수 없는 한계점을 지니며, 향후 진행될 후속 연구에서는 다양한 도로사업의 특성을 반영한 범용적인 도로사업 공사비 예측모형을 개발하고자 한다.

국내 도로사업에는 매년 막대한 예산이 투입되고 있으며 그 규모는 해마다 증가하고 있다. 따라서 효율적으로 예산을 편성하고 노선선정에 있어 경제적 의사결정을 지원하는 공사비 예측업무의 중요성은 지대하다. 본 연구에서 제시하는 기획 및 초기 설계단계 공사비 예측모형을 활용함으로써 공사비 예측업무의 정확성을 기하고 나아가 적절한 공사비 규모를 예측함으로써 예산절감 효과도 기대할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 광수남 (2007). "가용 정보를 활용한 기획 및 초기 설계단계 도로사업 공사비 예측모델 개발.", 석사학위논문, 연세대학교.
2. 국토해양부 (2005). 2005년도 국토건설공사 설계실무 요령, 국토해양부.
3. 국토해양부 (2007). 도로업무편람, 국토해양부.
4. 김광희·강경인 (2004). "사례기반추론 기법을 이용한 공동주택 초기 공사비 예측에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 제20권 5호, 대한건축학회, pp. 83~92.
5. 김광희·김상용·강경인 (2005). "공공주택 공사비 예측 정확도 비교에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 제20권 5호, 대한건축학회, pp. 93~102.
6. 김선국·신진수·구인완·김용구 (2000). "계획단계 도로공사의 통계적 코스트 모델", 대한토목학회 논문집, 제20권 2-D호, 대한토목학회, pp. 171~180.
7. 김재엽·박우열·김광희 (2006). "신경망과 사례기반추론을 이용한 흙막이공법 선정에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 제22권 5호, 대한건축학회, pp. 187~194.
8. 박종현 (2001). "건설공사 계획단계의 공사비 예측모형 개발",



박사학위논문, 중앙대학교.

9. 신진수 (1999). 공사실적자료에 의한 건설사업비 산정시스템 개발에 관한 연구 보고서, 건설교통부.
10. 안광호 (2005). SPSS를 활용한 사회과학조사방법론, 학현사.
11. 안성훈·강경인 (2005). “전문가지식을 활용한 공동주택 초기단계 공사비 예측에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집, 제 21권 6호, 대한건축학회, pp.81~88.
12. 이군희 (2003). 사회과학 연구방법론, 법문사.
13. 한국개발연구원 (2004). 도로·철도 부문사업의 예비타당성 조사 표준지침 수정·보완, 4판, 한국개발연구원.
14. Chou, J-S., Wang, L., Chong, W. K., and O'Connor T., J. (2005). “Preliminary Cost Estimates Using Probabilistic Simulation for Highway Bridge Replacement Projects”, Construction Research Congress.
15. Doğan, S. Z., Arditi, D., and Günaydin, H. M. (2006). “Determining Attribute Weights in a CBR Model for Early Cost Prediction of Structural Systems”, Journal of Construction Engineering and Management, 132(10), pp.1092~1098.
16. Liu, L. and Zhu, K. (2007). “Improving Cost Estimates of Construction Projects Using Phased Cost Factors”, Journal of Construction Engineering and Management, 133(1), pp.91~95.
17. Riesbeck, C. K. and Schank, R. C. (1989). Inside Case-Based Reasoning, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey.
18. Schank, R. C., Kass, A., and Riesbeck, C. K. (1994). Inside Case-Based Explanation, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey.
19. Watson, I. (1997). Applying Case-Based Reasoning: Techniques for Enterprise System, Morgan Kaufmann, San Francisco.
20. Wilmot, C. G. and Mei, B. (2005). “Neural Network Modeling of Highway Construction Costs”, Journal of Construction Engineering and Management, 131(7), pp.765~771.

논문제출일: 2009.01.15

논문심사일: 2009.01.16

심사완료일: 2009.03.20

Abstract

The quality of early cost estimates is critical to the feasibility analysis and budget allocation decisions for public capital projects. Various researches have been attempted to develop cost prediction models in the early stage of a construction project. However, existing studies are limited on its applicability to actual projects because they focus primarily on a specific phase as well as utilize restricted information while the amount of information collectable differs from one another along with the project stages. This research aims to develop two-staged cost estimation model for the schematic planning and preliminary design process of a construction projects, considering the available information of each phase. In the schematic planning stage where outlined information of a project is only available, the Case-Based Reasoning model is used for easy and rapid elicitation of a project cost based on the extensive database of more than 90 actual highway construction projects. Then, the representing quantity-based model is proposed for the preliminary design stage where more information on the quantities and unit costs are collectable based on the alternative routes and cross-sections of a highway project. Real case studies are used to demonstrate and validate the benefits of the proposed approach. Through the two-stage cost estimation system, users are able to hold a timely prospect to presume the final cost within the budge such that feasibility study as well as budget allocation decisions are made on effectively and competitively.

Keywords : Road Construction, Project Cost, Forecasting, Case-Based Reasoning, Multi-Regression Analysis
