

교량 유지관리 의사결정 지원을 위한 개축비용 산정모델 개발

선종완¹, 이동열^{1,2}, 이민재², 박경훈^{1*}

¹한국건설기술연구원 구조융합연구소, ²충남대학교 토목공학과

Development on Reconstruction Cost Model for Decision Making of Bridge Maintenance

Jong-Wan Sun¹, Dong-Yeol Lee^{1,2}, Min-Jae Lee², Kyung-Hoon Park^{1*}

¹Structural Eng. Research Division, Korea Institute of Civil Eng. and Building Tech.

²Department of Civil Engineering, Chungnam National University

요약 교량의 유지관리 비용은 교량 건설 후 주기적으로 발생하게 되며 교량의 상태, 환경 조건 등 여러 요인들이 복합적으로 고려되어야 한다. 개축은 유지관리 단계에서 발생하는 조치 중 가장 최종적이며 대규모 비용이 투입되는 조치로서 교량 유지관리 의사 결정 지원을 위해서는 기본적인 개축 비용 산정 모델의 수립이 필수적이다. 본 연구에서는 교량의 개축 비용 산정을 위한 회귀 모델을 개발하였다. 이를 위해 교량관리시스템(Bridge Management System) 데이터베이스(database) 상의 교량 기본 제원을 분석하여 교량 형식별, 구성 요소별 대표 표본과 주요 영향 인자들을 정의하였다. 각 표본별 비용 산정 변수를 고려하여 내역 작업을 수행하였다. 비용 산정 변수에 따른 대표 표본의 적산 결과를 회귀분석하여 상부구조, 하부구조, 기초 등의 신설 비용과 가교 설치 비용, 해체 폐기 비용에 대한 비용 모델을 도출하였다. 개발된 비용 모델을 활용하여 공용 중인 교량 형식별 개축 비용을 도출하고 단가를 산출하여 기존 문헌과의 비교 검토를 수행하였으며, 유지관리 의사결정에 효과적으로 활용될 것으로 기대된다.

Abstract The periodic maintenance of bridges is necessary once they have been constructed and its cost depends on various factors, such as their condition, environmental conditions and so on. To make a decision support system, it is essential to establish a basic reconstruction cost model. In this study, a regression model is suggested for calculating the reconstruction cost for typical cases and influential factors, depending on the type of bridge and its components, by analyzing the basic bridge specifications based on the data of the Bridge Management System (BMS). The details for each case were estimated in consideration of the cost calculation variables. The details for each case were estimated in consideration of the cost calculation variables. The cost model for the new construction of the superstructure, substructure and foundation and the temporary bridge construction and demolition costs were drawn from the regression analysis of the estimation results of typical cases according to the cost calculation variables. The reconstruction costs for different types of bridge were obtained using the cost model and compared with those in the literature. The cost model developed herein is expected to be utilized effectively in maintenance decision making.

Keywords : Bridge Maintenance, Maintenance Cost, Reconstruction Cost, Life Cycle Cost, Bridge Management System(BMS)

본 논문은 국토교통부의 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Kyung-Hoon Park(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

Tel: +82-31-910-0565 email: paul@kict.re.kr

Received June 16, 2016

Revised August 26, 2016

Accepted September 9, 2016

Published September 30, 2016

1. 서론

최근 교량의 보다 합리적인 유지관리를 위하여 생애 주기 분석을 통해 최적유지관리 전략을 수립하는 방법에 대한 연구가 활발하게 진행 중에 있다. 이러한 연구에서는 미래의 발생 가능한 비용의 추정과 성능의 변화를 예측하는 과정이 필수적이다[1].

미래에 발생할 비용은 직접비용과 간접비용으로 구분할 수 있다. 직접비용은 교량의 상태 및 안전 수준의 평가를 위한 점검 및 진단 비용, 설계 수준의 내구성 및 안전성을 확보하기 위한 보수보강비용, 설계수명에 도달하였거나 사회적, 경제적인 필요로 수행되는 개축비용 등으로 구분된다. 간접비용은 보수보강이나 개축으로 인한 교통통제에 따른 도로이용자비용과 열화손상 등으로 인한 교량의 통행 차단 가능성을 고려해 산정되는 위험비용으로 구분할 수 있다. 이 중 개축은 개별 교량의 유지관리 단계에서 발생하는 조치 중 가장 최종적이며 대규모 비용이 투입되는 조치이다. 일반적인 개축 기본 대상으로 고려되는 30년 이상 사용된 교량의 비율이 지속적으로 증가할 것으로 예상되므로[2], 적절한 개축 전략(시기, 물량 등)을 수립하는 것은 유지관리 단계에 가장 중요한 의사결정 문제라고 할 수 있다.

합리적인 개축 전략을 수립하기 위해서는 기본적으로 교량의 현재 성능 파악 및 미래 성능 예측과 더불어 개축비용 산정 모델의 개발이 필요하다. 이에 본 연구에서는 유지관리단계에서 교량의 개축 관련 의사결정시 필요한 개축비용 산정을 위한 모델을 제안하고자 한다. 이를 통해 교량의 생애주기 특정시기에 개축이 적용되었을 때 비용 추정, 다양한 개축대안들 간의 비용차이 분석 등을 통하여 효과적인 비용투자에 대한 의사결정 지원과 예산 절감을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구를 위해 Fig 1과 같이 선행연구동향을 고찰하여 개발 방향을 설정한 후, 일민국도 교량관리시스템 (Bridge Management System, 이하 BMS)[3] 데이터베이스(Database, 이하 DB)상의 교량 기초 제원 통계를 이용해 교량 형식별, 구성요소별 대표 표본을 정의하였다. 대표 표본별 내역 작업을 수행하고 교량형식별 개축비용 산정에 큰 영향을 미치는 주요 영향인자를 정의하고 비용산정 변수를 도출하였다. 표본별 비용산정 변수에 따른 적산결과를 회귀분석하여 교량형식별, 구성요소별 개축비용에 대한 회귀함수식을 도출하고 제안된 비용모델

을 통해 산출된 개축비용을 기존의 문헌과 비교하여 적정성을 검증하였다.

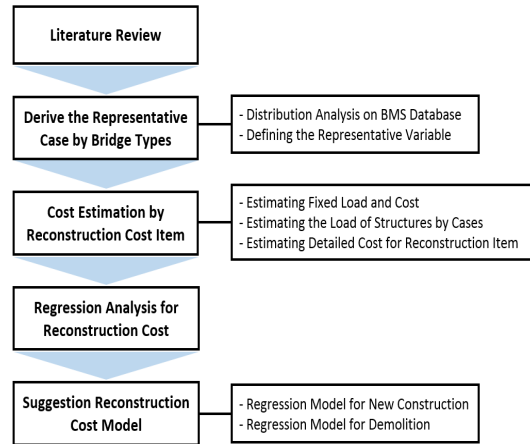


Fig. 1. Research Process

2. 기존연구동향

현재 국내 교량의 유지관리 비용 산정과 관련한 연구는 한국도로공사, 국토교통부 등 공공관리주체와 정부기관 등을 중심으로 이루어지고 있다. 한국도로공사에서는 교량의 신설비용과 해체·폐기비용을 교량 형식별 단위면적당 단가를 이용하여 산정하고 있으며[4], 공공 교통 시설 개발 사업에 관한 투자평가 지침서에는 교량의 면적당 단가를 적용하여 최근 3년 내 완료된 유사 실시설계 평균단가를 바탕으로 비용을 산정하는 방안을 제안하고 있다[5]. 도로업무편람에는 일정 교량폭(4차로기준)에 대한 교량 형식별 단위면적당 비용을 산출하여 도로구분과 교량 상부구조형식에 따른 비용을 제시하고 있다[2].

한편 설계 초기단계의 공사비 산정모델을 제시하기 위해 강박스거더 교량의 건설 자료를 분석하고 대표공종에 대한 단위물량을 산출하여 기획단계에서 교량의 연장과 바닥면적을 변수로 하는 함수식을 도출하였으며, 설계단계에서 공사비와 중요도가 높은 항목을 선정하여 단위물량을 산정하고 공종별 단가를 이용하여 공사비를 예측하는 방안을 제시하였다[6]. 또한 총공사비에서 공사비 비중 및 해당공종의 중요도가 높은 항목을 중심으로 설계초기의 가용정보를 바탕으로 상부면적당 단위물량과 차로수별 공사단가를 도출하여 이를 기반으로 상부

면적당 단가를 도출하는 개략공사비 모델을 제시하였다[7]. 기획단계의 제한된 정보 하에서 활용 가능한 사례분석기반추론 방법론을 이용하여 철도교량의 비용산정 모델을 제안하는 연구가 수행되었으며, 이를 위해 유사교량의 정보를 수집하고 교량형식, 경간수, 경간의 길이와 높이 등을 영향인자로 고려하여 비용을 산정하였다[8].

해외에서도 교량의 유지관리단계에 투입되는 비용에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 개축비용 산정과 관련된 연구는 다음과 같다. 190여 개의 교량 개축 데이터를 바탕으로 임의요인(random effects)에 대한 개축비용 산정모델을 제안하였으며, 이를 위해 교량 개축 데이터의 빈도분석(Frequentist approach)과 Bayesian 분석에 다중회귀 분석(Multiple regression)을 적용하였다. 연구를 통해 도출된 모델을 최소자승법(ordinary least squares) 모델과 비용 산출 결과를 비교하였다[9]. 교량의 개축비용 산정을 위해 비용에 영향을 주는 변수를 정의하고 교량을 상부구조, 하부구조, 바닥판으로 구분하여 비선형회귀모델을 제안하는 연구와[10] 교량 개축비용을 상부교체비용, 하부교체비용, 접근비용, 기타 비용으로 나누어 영향인자를 도출하고 통계분석을 실시하여 콘크리트 및 강재 교량의 교체비용 산정 방안을 제안한 연구가 수행되었다[11].

한편 미국은 교량의 규모가 막대하고 노후화가 진행된 교량이 많아 이에 대한 대응책으로 관리주체별로 교량의 유지관리에 대한 매뉴얼을 작성하여 활용하고 있으며, 이 중 NYDOT에서는 교량 건설 및 개축 시 기존 정보를 이용하여 교량 개축비용 산정에 활용할 수 있도록 엑셀(Excel) 프로그램 기반의 Preliminary Cost Estimate Worksheet를 제공하고 있다. 또한 비용 산정에 활용하기 위해 최근 10년간의 실적자료를 함께 제공하고 있다[12].

기존의 연구들은 비용산정에 영향을 주는 인자를 도출하고 이를 반영하는 방안을 고려하며, 대부분 교량 형식별 단위 면적당 단가를 이용하여 개략적인 공사비의 산정 방안을 제시하였다. 이러한 기존 연구들은 대상교량의 범위가 한정적이고, 경간 구성의 변화와 형식별 하부구조에 작용하는 상부구조의 중량, 지형조건에 따른 하부구조의 높이와 같이 비용에 영향을 주는 요인들을 고려하지 못하였다. 또한 미국 등에서 사용하고 있는 실적공사비 바탕의 개축비용 산정방안도 대상교량의 면적당 비용을 고려하는 수준에서 사용되고 있어 계획단계의 참고자료로만 활용 가능한 실정이다.

3. 개축비용 산정을 위한 변수 선정

3.1 대표 표본 정의

개축은 기존 교량을 폐쇄하고 신규 교량을 건설하는 것을 의미하기 때문에 최근 신규 건설된 교량에 주로 사용되는 형식을 개축 형식으로 정의하여야 한다. 따라서 개축비용 추정을 위한 회귀분석 모델 개발을 위한 표본이 필요하며, 이를 위해 교량 구성요소 및 제원 정보 분석을 수행하였다. 현재 공용중인 교량의 상세 정보는 BMS DB를 통해 획득하였다. Table 1.은 도출된 대표 표본을 정리한 것이다.

BMS DB 분석을 바탕으로 교량 상부구조형식은 구성비가 높은 RC슬래브교(RCS), PSCI거더교(PSCI), 강박스거더교(STB), 라멘교(RA), 강I거더교(STI), PSC박스거더교(PSCB), 프리플렉스거더교(PF) 등 7개의 형식을 대표 형식으로 선정하였다. 전체 도로교 형식 중 해당 형식이 차지하는 비율은 약 91.6%에 이른다[2]. 또한 각 상부구조 형식별로 적용 경간장이 다르고 회귀분석을 위해서는 최소 표본 개수가 2개 이상 되어야 하기 때문에, 상부 형식별 경간장 분포 분석을 통해 대표 경간장을 선정하였다. 그리고 상부구조 총폭, 차로수 역시 최근 10년 내 건설 빈도가 가장 높은 편도 2차선(1차선 24.8%, 2차선 56%, 3차선 13%)과 평균 총폭 10.5m를 대표 제원으로 정의하였다.

하부구조도 상부구조와 유사하게 BMS DB 상의 교대·교각의 형식 및 기초의 형식에 대한 빈도수 분석을 수행하여 빈도수가 가장 큰 YT형 교대, T형 교각을 하

Table 1. Representative Case

Classification		Representative Case	
Super structure	Length	RCS	10, 12.5, 15m
		PSCI	25, 30, 35m
		STB	40, 50, 60m
		Rahmen	10, 13, 16m
		STI	10, 15, 20, 25m
		PSCB	40, 50, 60m
		PF	30, 35, 40m
	Temporary Bridge	20, 40, 60m	
Width	10.5 m based on two-lanes		
Sub structure	Height	Abutment(Reversed T-shaped)	3, 7, 12m
		Pier(T-shaped)	3, 10, 17, 25m
		Rahmen	4, 6, 8, 10m
		Temporary Bridge	3, 10, 17, 25m

부구조의 대표형식으로 정의하였으며, 교대·교각 높이에 대한 통계분석을 통해 Table 1.과 같이 각 표본을 정의하였다. 기초는 적용 빈도가 높은 확대기초 및 말뚝기초를 고려하였다.

라멘교와 같이 상부와 하부가 일체형으로 구성된 교량 형식은 별도로 분석을 실시하였으며, 가설교량의 상부구조는 연장 20m부터 60m까지, 교각 높이는 일반적인 교량과 동일한 조건으로 고려하였다.

3.2 구조체 중량 추정을 위한 변수 정의

교대·교각과 같은 교량 하부구조는 상부구조의 중량과 교통하중 등을 지지하는 부재로서 적정한 물량의 산출을 위해서는 단면의 단위면적당 지지력이 고려되어야 한다. 따라서 교대·교각의 높이와 함께 적합한 단면적이 고려되기 위해서는 상부구조를 구성하고 있는 부재의 단위 중량을 계산하여야 한다. 이를 위해 Table 2.와 같이 교량 상부구조를 구성하고 있는 난간(Guard Rail), 중앙분리대(Median Barrier), 바닥판, 거더 등의 단위중량을 고려하였으며, 해당 부재의 물량에 따라 총중량을 도출하였다.

기초 또한 하부구조와 유사하게 동일한 지반 환경에서 비용의 차이는 상부구조와 하부구조의 중량에 따른 물량에 좌우되는 것으로 고려하였다. 기초에 작용하는 하중은 앞서 도출된 상부구조의 중량과 상부구조 중량을 지지하는 하부구조의 중량을 합산하여 고려한다.

Table 2. Guide for Calculating Weight of Superstructure and Substructure

Classification	Specification	Unit Load	Unit	Source
Guard Rail	H=1.1m	0.1	tonf/m	Design Code for Highway Bridges
Median Barrier	Ready-mix Concrete : 0.391m ³ /m Rebar(D25) : 2.209kg/m Wire Mesh : 1.015m ² /m	0.891	tonf/m	Standard for Median Barrier of Korea Expressway Corporation
Pavement	Asphalt(T=8.0cm)	0.18	tonf/m ²	Design Code for Highway Bridges
Concrete Structure	Reinforced Concrete	2.5	tonf/m ²	Design Code for Highway Bridges
Steel Structure	Structural Steel	7.85	tonf/m ³	

4. 개축비용모델 개발

4.1 개축비용모델 개발 및 회귀분석 방법

본 연구에서 제안하는 회귀분석을 통한 개축비용 산출을 위하여 개축비용의 정식화를 수행하였다. 전체 개축비용은 식 (1)과 같이 신설 교량의 시공비용(C_{con}), 기존 교량의 해체·폐기 비용(C_{dem}), 교통흐름 유지를 위해 선택적으로 설치되는 가교 설치비용(C_{temp})으로 구성하였다.

$$C_{rec} = C_{con} + C_{dem} + C_{temp} \quad (1)$$

여기서 시공비용은 식 (2)와 같이 각각 선택된 교량 형식별 상부구조비용(C_{con}^{super})과 하부구조비용(C_{con}^{sub}), 기초비용(C_{con}^{found})의 합으로 구성할 수 있다. 상부구조비용은 개축 표본에 대한 내역 분석을 통해 교량 개소 당 설치되는 항목에 의한 비용(교명판, 교명주 등)과 차로 당 설치되는 비용(난간, 중앙분리대 등), 앞선 두 항목을 제외한 교량 규모에 따른 비용(각종 재료비 등)으로 구분하였다. 또한 하부구조비용은 상부구조 중량과 하부구조 높이의 함수로 비용이 결정되며, 기초비용은 상부구조 및 하부구조의 중량에 따라 비용이 결정되는 함수로 정의하였다.

$$C_{con} = C_{con}^{super} + C_{con}^{sub} + C_{con}^{found} \quad (2)$$

해체·폐기비용은 식 (3)과 같이 바닥판(C_{dem}^{deck}), 거더(C_{dem}^{gir}), 하부구조(C_{dem}^{sub})에 대한 함수로 정의할 수 있다. 바닥판은 상부 연장과 폭의 곱인 서비스면적의 함수로, 거더는 강박스 교량, PSC 교량, 강 I거더로 구분하여 연장과 높이의 함수로, 하부구조는 상부 고정중량과 하부구조 높이의 함수로 정의하였다.

$$C_{dem} = C_{dem}^{deck} + C_{dem}^{gir} + C_{dem}^{sub} \quad (3)$$

가교설치비용은 상부구조(C_{temp}^{super})와 하부구조(C_{temp}^{sub})로 나누어 계산할 수 있으며, 임시 교량의 연장(L_{temp}), 높이(H_{temp}) 및 상부 고정중량(DL_{super})등을 고려하여 식 (4)와 같이 정의하였다.

$$C_{temp} = C_{temp}^{super}(L_{temp}) + C_{temp}^{sub}(DL_{super}, H_{temp}) \quad (4)$$

회귀모델을 제안하기 위해 회귀함수의 주요 변수는 개축비용 항목별 영향인자를 고려하여 Table 3과 같이 정의하였다. 회귀분석을 위해 Matlab(R2010a, Ver 7.10.0.499)의 Regression Tool Box를 사용하였으며 회귀함수의 모델은 다변수 비선형 회귀함수(Multivariable Non-linear Regression Function)를 기본 모델로 하였다. 회귀분석결과 2차함수 적용시 본 연구를 통해 산출된 기초 비용데이터 내에서는 경향성이 높지만 데이터 범위를 초과하거나 미만인 경우에 대해서는 오차가 커지는 경향이 나타나 본 연구에서는 다변수 1차함수를 적용하였다.

Table 3. Major Variable for Reconstruction Regression Model

Classification		Primary Variable	Secondary Variable
New Construction	Superstructure	Span Length	Height (Rahmen only)
	Substructure	Height	Superstructure Weight
	Foundation	-	Super and Sub structure Weight
Demolition	Deck	Deck Area	-
	Girder	Span Length	Height (Rahmen only)
	Substructure	Height	Superstructure Weight
Temporary Bridge Construction	Superstructure	Span Length	-
	Substructure	Height	Superstructure Weight

4.2 상부구조 비용모델 개발

상부구조는 교량 형식별로 Table 1에서 정의한 연장과 폭을 갖는 표준 개축표본을 이용해 비용 내역작업을 수행하였다. 본 연구에서 순공사비용은 교량의 개축시 발생하는 개소당 고정비용을 제외한 공사비용을 의미하며, 교량 연장에 따른 교량의 상부구조 순공사비용의 관계는 Fig 2와 같다.

상부구조의 비용추정을 위해 도출된 비용모델의 회귀계수는 Table 4와 같다. 라멘교를 제외한 일반형식의 상부구조는 연장만 고려하여 구성하였으며, 라멘교의 경우 상·하부 일체형 구조이므로 연장계수와 높이계수를 모두 고려하여 회귀함수를 도출하였다. 회귀모델의 결정계수(R^2)가 최소 0.9677에서 1.0까지 분포하여 정도가 높은 것으로 판단된다.

상부구조 중량과 하부 개축비용과의 상관관계를 알아보기 위해 대표 표본별로 Table 2를 이용해 산정된 중량을 도식화하면 Fig 3과 같다. 상부구조물의 연장 증가에 따라 중량도 일정하게 증가하는 경향이 나타나며, 상하부 일체형 구조인 라멘교 특성상 동일 연장의 교량 상부 중량보다 높게 분포하는 경향을 나타낸다.

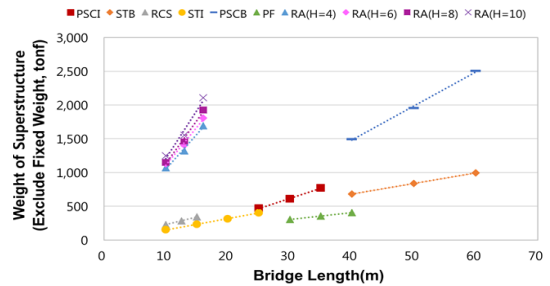


Fig 2. Net Construction Cost according to Bridge Length

Table 4. Coefficient of Regression Model for Superstructure Cost Estimation(Million Won)

Classification	Length Coefficient	Height Coefficient	Constant	R-Square (R^2)
Fixed Cost	-	-	2.2849	-
Fixed Cost per Lane	5.055E-01	-	-	1.000
PSCI	8.4282E+00	-	-6.3210E+01	0.9981
STB	1.2560E+01	-	3.9752E+01	0.9999
RCS	4.4250E+00	-	9.4126E+00	0.9990
STI	1.6553E+01	-	-4.4893E+01	0.9938
PSCB	1.3594E+01	-	-1.0667E+02	0.9982
PF	1.8812E+01	-	-2.6493E+02	0.9965
RA	1.6171E+01	6.0946E+00	-4.8583E+01	0.9677

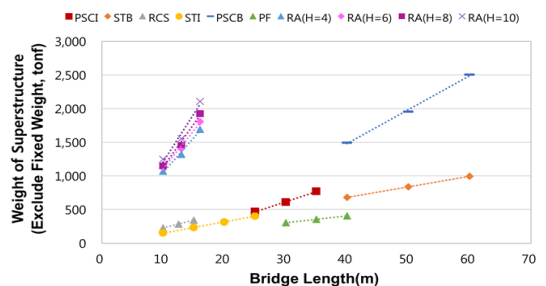


Fig 3. Weight of Superstructure according to Bridge Length

4.3 하부구조 비용모델 개발

교량 상부구조 중량에 따른 하부구조 신설비용과의 관계는 Fig 4, Fig 5와 같이 분석되었다. 하부구조는 일반적으로 지지하는 상부구조 중량이 높아질수록, 교대·교각의 높이가 증가할수록 비용이 증가하는 경향을 나타낸다. 교대는 상부중량이 증가함에 따라 비용이 일정하게 증가하는 경향을 나타내며, 교각은 STB교량의 교각 건설비용이 중량에 비해 다소 높게 분포하여 교대에 비하여 상관도는 낮으나 유사한 경향임을 확인할 수 있다. 고교각의 가설을 위해 강제 거푸집 대신 슬립폼(Slip-Form)공법을 적용하는 경우를 고려하였다. 같은 높이를 갖는 교각에 Slip-Form공법을 적용한 표본을 정의하고 비용 내역작업을 통해 강제거푸집 비용과의 비율을 도출하여 강제거푸집을 이용한 교각의 회귀분석결과에 반영함으로써 추가로 슬립폼공법에 대한 회귀모델계수를 도출하였다. 하부구조를 구성하는 교대 및 교각의 신설 비용모델의 회귀계수는 Table 5와 같다.

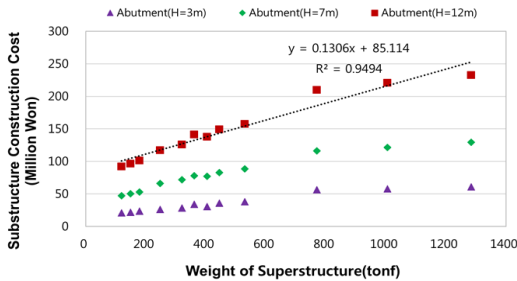


Fig 4. Substructure Construction Cost according to Weight of Superstructure(Abutment H=3m, 7m, 12m)

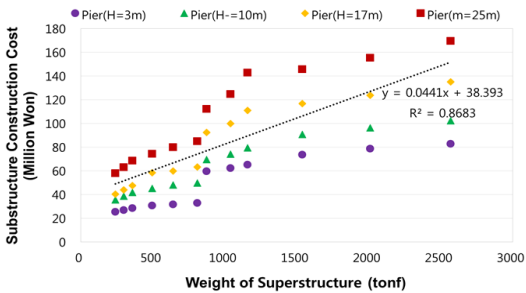


Fig 5. Substructure Construction Cost according to Weight of Superstructure(Pier H=3m, 10m, 17m, 25m)

Table 5. Coefficient of Regression Model for Substructure Cost Estimation(Million Won)

Classification	Weight Coefficient	Height Coefficient	Constant	R-Square (R ²)	
Abutment	1.2505.E+01	8.1147.E-02	-4.2230.E+01	0.9263	
Pier	Steel Form	2.5870.E+00	3.7786.E-02	3.6031.E+00	0.8525
	Slip-Form	2.7362.E+00	3.9964.E-02	3.8108.E+00	0.8525

4.4 기초 비용모델 개발

기초는 상부구조와 하부구조 중량을 지지하는 구조체이므로, 해당 지역 지반 조건이 일정하다고 가정하면 기초가 지지하는 중량에 따른 기초의 크기(확대기초의 경우 면적, 말뚝기초의 경우 말뚝의 수)가 신설비용을 좌우하는 주요 인자라 할 수 있다. 따라서 이에 대한 영향 및 적정성을 확인하기 위하여 Table 2.에 따라 선정된 개축 표본의 상부 및 하부 구조 중량과 기초비용과의 관계를 분석하였다. Fig 6과 같이 말뚝기초와 확대기초 모두 상부중량의 증가에 따라 신설비용이 증가하는 경향을 나타냈다. 상부구조의 중량을 변수로 고려하여 도출된 기초의 비용모델 회귀계수는 Table 6과 같다.

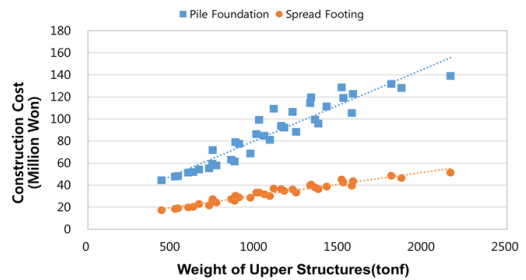


Fig 6. Correlation between Upper Weight and Construction Cost

Table 6. Coefficient of Regression Model for Foundation Cost Estimation(Million Won)

Classification	Weight Coefficient	Height Coefficient	Constant	R-Square (R ²)
Pile	-	6.4419E-02	1.6197E+01	0.8921
Spread Footing	-	2.1316E-02	8.9975E+00	0.9445

4.5 가교 비용모델 개발

가교비용은 교량의 신설비용과 유사하게 상부구조는 연장을 고려하고 하부는 높이와 상부의 작용중량을 고려

하여 계수를 도출하였다. Fig.7은 상부구조의 길이에 따른 건설비용과 하부구조의 중량 및 높이에 따른 건설비용을 분석한 결과이다. 상하부구조로 구분하여 도출된 비용모델의 회귀계수는 Table 7과 같다.

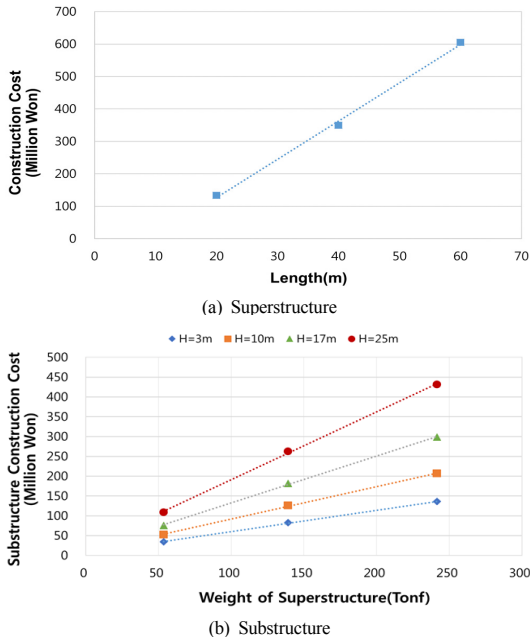


Fig 7. Cost Estimation Model for Temporary Bridge

Table 7. Coefficient of Regression Model for Temporary Bridge Cost Estimation(Million Won)

Classification	Length (Weight) Coefficient	Height Coefficient	Constant	R-Square (R ²)
Superstructure	1.1791.E+01	-	-1.0884.E+02	0.9975
Substructure	8.3322.E+00	1.0618.E+00	-1.0168.E+02	0.9040

4.6 해체·폐기비용 산정 모델

상부구조의 해체·폐기비용에 대한 회귀모델 계수는 바닥판과 거더의 해체·폐기비용 적산내역작업 결과를 바탕으로 Table 8과 같이 도출되었다. 거더는 일반적으로 많이 활용되는 PSC, STI, STB 등 세가지 계열로 세분화된 비용내역을 구성하여 적산하여 비용모델의 회귀 계수를 도출하였다.

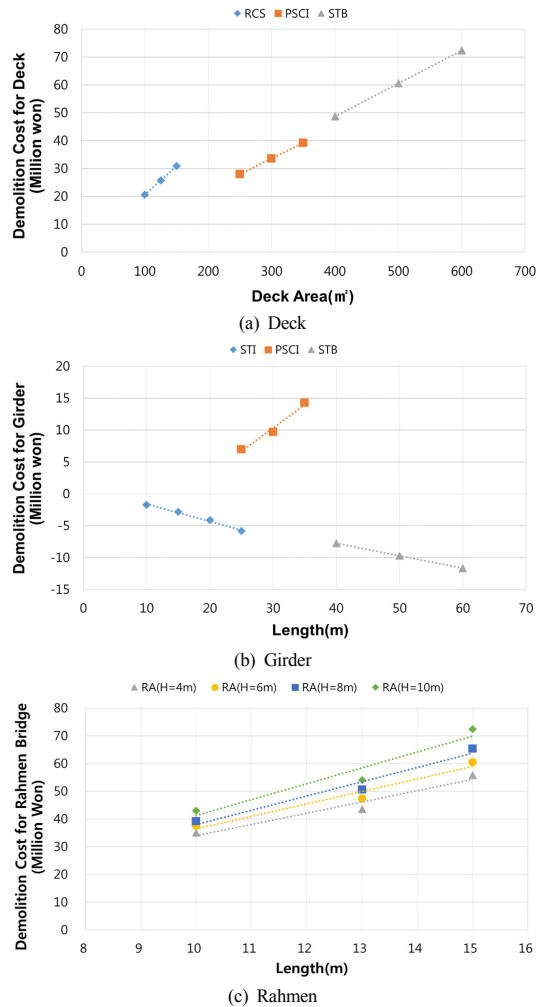


Fig 8. Cost Estimation Model for Demolition of Superstructure

Fig. 8과 같이 바닥판은 상부면적이 증가함에 따라 해체·폐기 물량이 증가하여 비용이 선형적으로 증가한다. 그러나 RCS 교량과 같이 별도의 거더 없이 하중을 지지하는 슬래브 형태 교량은 다른 거더교 형식의 교량에 비해 슬래브의 단면이 크기 때문에 비용 증가 폭이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 강교계열(STI, STB)은 연장증가에 따라 소요비용이 감소하는데, 이는 강재 재활용비용으로 인한 변화를 반영한 것이다.

하부구조의 해체·폐기비용 산정 모델 회귀계수도 신설교량의 비용모델과 마찬가지로 높이와 하부구조를 고려하여 Table 9와 같이 도출하였다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 교각에 비해 교대의 높이 증가에 따른 비용 증가폭

이 큰 것으로 나타났다.

Table 8. Coefficient of Regression Model for Superstructure of Demolition Cost Estimation(Million Won)

Classification	Length Coefficient	Height Coefficient	Constant	R-Square (R ²)	
Deck	9.7036.E-02	-	1.0074.E+01	0.9305	
Girder	STI Series	-2.7332.E-01	-	1.1690.E+00	0.9913
	PSC Series	7.2808.E-01	-	-1.1526.E+01	0.9781
	STB Series	-1.9483.E-01	-	4.7060.E-02	0.9999
RA	4.8507.E+00	1.9179.E+00	-2.4477.E+01	0.9441	

Table 9. Coefficient of Regression Model for Substructure of Demolition Cost Estimation

Classification	Weight Coefficient	Height Coefficient	Constant	R-Square (R ²)
Abutment	4.3376.E+00	3.3699.E-02	-1.6862.E+01	0.9600
Pier	1.4335.E+00	2.2427.E-02	-5.4801.E+00	0.9610

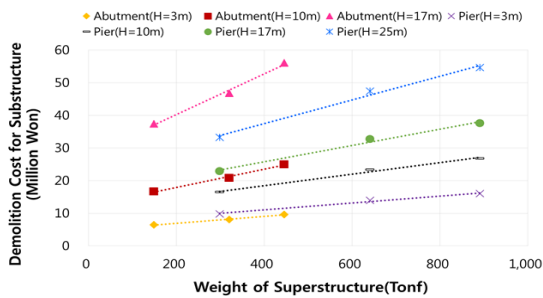


Fig 9. Cost Estimation Model for Demolition of Substructure

5. 비용모델의 검증

본 연구에서 제시한 비용 모델의 검증을 위하여 기존 모델에서 주로 제시하고 있는 단위면적당 신설비용을 비교하였다. 본 연구의 비용 모델은 상부연장, 경간구성, 하부구조의 높이를 고려하기 때문에 기존문헌[2][4][13]에서 제시하는 단위면적당 개축비용 단가와 직접적인 비교는 어렵다. 따라서 기존 문헌에 제시되어 있는 교량형식인 RCS, RA, PF, PSCI, STB에 대하여 제안된 회귀함

수를 이용해 관리주체 내 해당 형식을 갖는 교량(RCS 985개소, RA 1,266개소, PF 199개소, PSCI 1,319개소, STB 1,149개소)에 대한 개축비용을 산출하여 단위면적당 평균비용을 산출하였다. 본 연구의 회귀모델에 의한 비용은 제비율을 포함하지 않은 비용으로 일반적으로 적용가능한 교량 공사의 제비율 40%를 적용하였다.

기존문헌에서 제시하는 단가와 개발된 비용모델을 이용한 결과를 비교하면 Table 10 및 Fig. 10과 같다. 제안된 모델을 이용한 단가와 기존문헌에 제시된 단가와 차이는 3.8%~37.3%로 나타났다. 제안된 모델은 생애주기관리를 위한 미래 개축비용 추정이라는 활용목적에 비추어 볼 때 적절한 수준의 정도를 제공해준다고 할 수 있으며, BMS 시스템 내에서 지속적인 비용 모델 개선을 통해 정도가 지속적으로 향상될 것으로 판단된다.

Table 10. Construction Cost by Existing Literature and Cost Estimation Model(million won/m2)

Classification	RCs	Rahmen	PF	PSCI	STB	
Design VE Manual	2.048	1.990	2.692	1.873	2.809	
Guideline for Life Cycle Cost Analysis	2.496	2.660	-	1.862	2.669	
White Paper of Korean Roads	-	3.053	2.080	1.636	-	
Cost Estimation Model	Average Cost	1.944	3.172	2.521	1.724	2.304

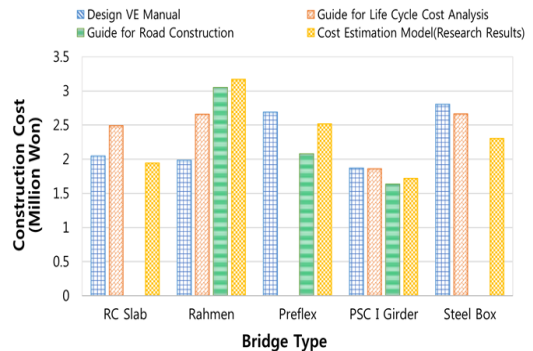


Fig 10. Comparison Cost Estimation Model with Existing Literature

6. 결론

본 연구에서는 교량의 생애주기관리를 위한 교량관리 시스템의 비용모델 중 개축비용 산정에 활용하기 위한

모델의 개발을 수행하였다. 기존의 단순 신설교량의 공사비로부터 면적당 또는 길이당 평균 단가 개념의 개축 비용이 아닌, 현재 공용중인 교량의 구조적, 환경적 특성을 고려한 맞춤형 개축비용 도출이 가능한 방법을 제안하였다. 현재 공용중인 교량 형식의 통계분석을 통해 특수교량 형식을 제외한 모든 교량 형식을 포함하며, 비용산정에 영향을 줄 수 있는 상부 및 하부 구조 중량, 하부구조의 높이 등을 고려하였다. 또한 가교의 설치와 해체·폐기 등 개축 시 발생할 수 있는 항목에 대해서도 고려할 수 있도록 하였다.

교량관리시스템에서 보유하고 있는 공용 중인 교량에 대한 방대한 정보 분석을 통해 교량 개축비용 산정에 영향을 줄 수 있는 변수를 선정하고, 주요 인자인 상하부구조 중량 추정과 상부구조 중량에 따른 적정 하부구조 제원 도출이 가능하도록 하였다. 개축비용에 포함되는 모든 비용항목을 정의하고, 비용산정 인자를 정의하여 이를 변수로 하는 회귀비용 모델을 제안하였다.

본 연구에서 제시한 회귀분석 모델은 기존의 획일적인 교량 개축비용 산정방식을 보완하여 효율적인 공사비 산정이 가능하며, 교량의 상부중량에 따른 하부공사 비용산정을 고려함으로써 공사비 예측의 정확도를 높일 수 있다. 회귀분석을 통해 개발된 비용모델은 교량의 특성별 속성을 반영하여 유지관리 계획단계에서 개축 의사결정 지원에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 시간에 따른 비용변화 효과를 반영하기 위하여 개축표본의 적산과정을 통해 표준화된 개축 표본을 구성하는 일위대가, 품셈, 실적공사비 등 각 항목별 단가를 물가인상, 인건비 변화 등을 고려하여 갱신하고 회귀분석을 재수행하는 반복적 절차를 통해 개축비용모델을 갱신하여 신뢰도를 증진시킬 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Developing Bridge Management System considering Life-Cycle Cost and Performance of Bridges, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012.
- [2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, White Paper of Korean Roads, 2014.
- [3] <https://nbms.kict.re.kr> (accessed Jun., 10, 2016)
- [4] Korea Expressway Corporation, Guideline for Life-cycle Cost(LCC) Analysis of Expressway Bridges, 2003.

- [5] Ministry of Construction and Transportation, Guideline for investment evaluation of Transportation Development, 2007.
- [6] Chang Won Sun, Kab Sao Kyung, Shim Hwa Kang, Soon Cheal Kwon, "Analysis on Characteristic of Construction Cost for Steel Box Bridge", Journal of The Korean Society of Steel Construction vol. 21, no. 1, pp. 1-14, 2009.
- [7] Sang-Bum Kim, Ji-Hoon Cho, "Development of the Approximate Cost Estimating Model for PSC Box Girder Bridge based on the Breakdown of Standard Work", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, vol. 33, no. 2, pp. 791-800, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.2.791>
- [8] Byung-soo Kim, Taehoon Hong, "Revised Case-Based Reasoning Model Development Based on Multiple Regression Analysis for Railroad Bridge Construction", Journal of Construction Engineering and Management, vol. 138, no. 1, pp. 154-162, 2012.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000393](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000393)
- [9] Behrouz Behmardi, Toni Doolen, Holly Winston, "Comparison of Predictive Cost Models for Bridge Replacement Projects", Journal of Management in Engineering, vol. 31, no. 4, 2015.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000269](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000269)
- [10] Indushobha N. Chengalur-Smith, Donald P. Ballou, Harold L. Pazer, "Modeling the Cost of Bridge Rehabilitation", Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 31, Issue 4, pp. 281-293, 1997.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0965-8564\(96\)00028-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0965-8564(96)00028-6)
- [11] Marcela M. Rodriguez, Samuel Labi, Zongzhi Li, "Enhanced bridge replacement cost models for Indiana's bridge management system", Transportation Research Record 1958, pp. 13-23, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3141/1958-02>
- [12] New York Department of Transportation, Program Development Unit[internet]. Preliminary Cost Estimating Worksheet for New and Replacement Bridges, <https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/structures/manuals/preliminary-cost> (accessed Jun., 10, 2016).
- [13] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Design VE Manual of National Road Construction, 2009.

선 종 완(Jong-Wan Sun)

[정회원]



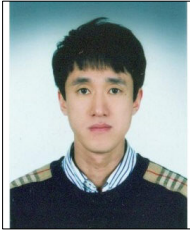
- 2004년 2월 : 한양대학교 대학원 토목환경공학과 (구조공학석사)
- 2010년 8월 : 한양대학교 토목공학 (구조공학박사)
- 2008년 8월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 구조융합연구소 연구원

<관심분야>

기반시설생애주기관리, 구조신뢰성

이 동 열(Dong-Yeol Lee)

[정회원]



- 2010년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (건설관리학석사)
- 2013년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (건설관리학박사수료)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 대학원 연구생(한국건설기술연구원 학생연구생)

<관심분야>

건설관리, SOC 자산관리

이 민 재(Min-Jae Lee)

[정회원]



- 2000년 12월 : 위스콘신대학교 (건설관리학석사)
- 2002년 12월 : 위스콘신대학교 (건설관리학박사)
- 2003년 3월 ~ 2003년 12월 : 위스콘신대학교 강사 및 연구원
- 2004년 2월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

건설관리, SOC 자산관리

박 경 훈(Kyung-Hoon Park)

[정회원]



- 1998년 8월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (구조공학석사)
- 2006년 2월 : 한양대학교 대학원 토목환경공학과 (구조공학박사)
- 1999년 3월 ~ 2000년 2월 : 한양대학교 강사
- 2000년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 구조융합연구소 수석연구원

<관심분야>

교량공학, 기반시설생애주기관리