

BIM 기반 사장교의 개념설계 및 예가분석 시스템 개발

천경식¹, 박원태^{2*}

¹포스코건설 R&D센터 인프라연구그룹, ²공주대학교 건설환경공학부

BIM System Development for Conceptual Design and Pre-Feasibility Study of Cable-Stayed Bridge

Kyoung-Sik Chun¹, Won-Tae Park^{2*}

¹Infra Research Group, R&D Center, POSCO Engineering & Construction

²Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University

요약 본 연구는 2주탑 3경간 사장교의 사업기획 단계에서 3차원 모델정보에 기반하여 신속한 개략 공사비 및 물량 산정을 지원하는 시스템을 개발하였다. 우선, 기 설계된 사장교 설계정보(구조계산서, 도면, 수량)를 분석하여 설계변수를 도출하였다. 도출된 설계변수를 기반으로 매개변수적으로 사장교를 3차원 모델링하는 BIM Wizard를 개발하였다. BIM Wizard를 이용해 작성된 3차원 모델로부터 사장교의 주요 재료에 대한 수량을 직접 산출하며, 케이블 교량에 대한 단가 D/B와 산출된 수량을 연계하여 개략공사비를 산정할 수 있다. 결과적으로, 사업 초기단계에서 m당 혹은 m²당 실적 평균공사비를 산출하는 재래적인 방식보다 더 구체화된 공사비를 산출할 수 있는 시스템을 구축하였다. 이로써, 우리는 사장교에 대해 입찰단계에서 가능한 신속하게 다양한 대안을 검토할 수 있을 것이다.

Abstract This paper has developed the system for supporting the approximate construction cost and the quantity estimation based on 3D model information in the pre-project planning phase of 3-span continuous cable-bridge with 2-pylons. First of all, we'd analyzed the design information (structural design report, blueprint and quantity) of the existing cable-stayed bridges and derived the design variables of cable-stayed bridges. We developed the BIM wizard that generates a cable-stayed bridge model parametrically based on derived design variables. The principle material quantities of cable-stayed bridge are calculated directly from 3-dimensional bridge model built by using the BIM wizard. Then, we can estimate the construction cost in relation to its quantities and unit cost of cable-stayed bridge. In a result, we have established the system that the construction cost can be estimated more specific than the conventional method (construction estimates per meter or square meter). We hereby will be able to review various alternatives as soon as possible in bidding process.

Keywords : BIM, Cable-Stayed Bridge, Construction Estimate, Pre-Project Planning Phase, 3D Bridge Model

1. 서론

사업기획 및 입찰단계에서 수주 경쟁력 강화를 위해서는 주요 구조물에 대한 다양한 대안검토가 필수적이다. 특히, 케이블교에 대한 정확한 검토를 위해서는 대안별

로 기본적인 구조해석과 수량 산출을 위한 기본도면을 작성하고 물량을 산출해야 한다. 이러한 설계 절차는 막대한 시간과 비용의 투입이 요구된다. 이에, 사업개발 초기에는 과거 실적 데이터(엑셀 등)를 바탕으로 한 m당 혹은 m²당 실적 평균 공사비를 통해 산출하는 방법이 일

본 논문은 포스코건설 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Weon-Tae Park(Kongju National University)

Tel: +82-41-521-9305 email: pwtae@kongju.ac.kr

Received August 24, 2015

Revised October 1, 2015

Accepted October 8, 2015

Published October 31, 2015

반적이다. 그러나 이와 같은 개략적인 공사비 산출 방법은 시설물의 요구조건 및 현황을 반영할 수 없고, 각 부위별 공사비를 추정하고 조율하기에는 산출된 정보에 한계가 있다.

본 연구에서는 2주탑 3경간 케이블 교량 프로젝트의 사업기획 단계에서 개략 공사비를 산정하는 시스템 개발을 목표로 하였다. 이를 위해 기 설계된 케이블교의 설계 정보를 분석하여 Parametric Modeling이 가능한 BIM Wizard를 개발하였다. Wizard를 이용해 구축된 3차원 교량모델로부터 주요 부재(케이블, 보강형 및 주탑)에 대한 수량을 산출하고, 케이블 교량에 대한 단가 D/B와 연계하여 개략공사비를 산정할 수 있도록 하였다. 이로써 종래 사업 초기단계에서 m당 혹은 m²당 실적 평균공사비를 산출하는 방식과 비교하여 보다 구체화된 개략공사비를 산출할 수 있고, 좀 더 다양한 대안을 검토할 수 있는 기반을 제공할 수 있다.

2. 주요 부재별 단면설정

본 연구에서는 교량의 주요 부재(케이블, 보강형, 주탑 등)에 대하여 기본단면 형태를 폭원별로 정의하고, 기본단면에 대한 제원은 기존 설계자료를 분석하여 단면강성에 대한 추세를 도출, 이를 기반으로 적정 단면강성을 갖는 기본단면의 크기(치수)를 파라메트릭 방식으로 결정하였다. 본 논문에서는 강합성 I형 거더를 갖는 사장교에 대해 그 개발내용을 다음과 같이 간단히 기술한다.

2.1 보강형(거더)

국내 사장교에 사용된 강합성 I형 거더의 주요 단면제원을 정리하면 Table 1과 같다. Table 1에서 “System Value”이란 본 연구에서 개발한 시스템에서 사용하는 기본단면의 두께를 의미한다. Table에서 보듯이, I형 거더의 웹(Web) 두께는 20mm로 정해져, 그 상·하부 플랜지(Flange) 두께는 가변요소로 정의하였다. 가변요소는 설계사례에서 알 수 있듯이 교량 규모, 즉 최대경간장 및 폭원에 따라 달라지는 값으로써, 기존 설계사례를 기반으로 도출한 단면강성에 대한 추세선에 기반하여 다음 절차에 따라 교량규모별 적정 단면강성을 가질 수 있도록 시스템내에서 자동산정하고, 이를 단면 초기치로 사용하였다.

Table 1. Current states of composite I-girder

Bridge No.	Upper Flange		Web		Lower Flange	
	Width	Thickness	Width	Thickness	Width	Thickness
1	337	26	1600	30	900	46
2	490	36	1895	20	800	36.3
3	939.3	66.6	3133	21.6	1200	53.3
4	500	30	3000	20	700	40
5	850	50	2600	22	1000	44.7
System Value	-	Var.	-	20	-	Var.

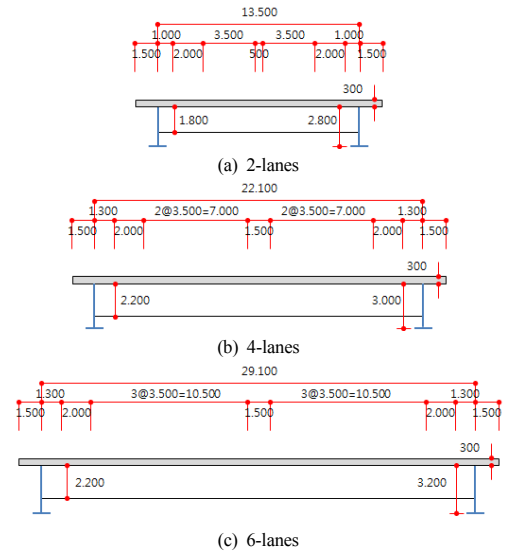


Fig. 1. Basic section of composite I-girder

- (1) 예제 단면을 통해 면적, 단면 2차 모멘트에 대한 강성 추세를 각각 도출한다.
- (2) 기본 단면에서 가변요소를 변화시키면서 면적과 단면 2차 모멘트에 대한 강성 추세를 각각 도출한다.
- (3) 각 단면강성에 대하여 (1)을 만족하는 두께를 구하는 식을 이용하여 단면 두께를 산정한다.
- (4) (3)을 통해 구한 두께 중 가장 큰 값을 단면 두께로 적용한다.

Fig. 1은 Table 1을 기반으로 본 연구에서 강합성 I형 거더에 대하여 정의한 기본단면 형태 및 제원을 나타낸 것이다. 기본단면에서 상·하부 플랜지(Flange)의 두께를 변경하면서 추출한 단면강성을 그래프로 도식화하여 Fig. 2에 나타내었고, 이를 기반으로 도출한 각 단면강성에 대한 추세선 식은 식 (1), (2), (3)과 같다.

$$A^{2-lanes} = 0.0037t + 0.1083 \quad (1a)$$

$$A^{4-lanes} = 0.0037t + 0.1163 \quad (1b)$$

$$A^{6-lanes} = 0.0037t + 0.1243 \quad (1c)$$

$$I_x^{2-lanes} = 0.0072t + 0.0554 \quad (2a)$$

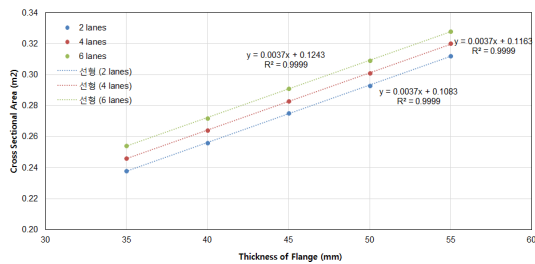
$$I_x^{4-lanes} = 0.0083t + 0.0711 \quad (2b)$$

$$I_x^{6-lanes} = 0.0094t + 0.0884 \quad (2c)$$

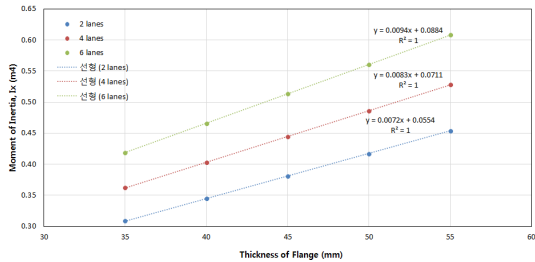
$$I_y^{2-lanes} = 0.1691t + 4.9397 \quad (3a)$$

$$I_y^{4-lanes} = 0.4520t + 14.214 \quad (3b)$$

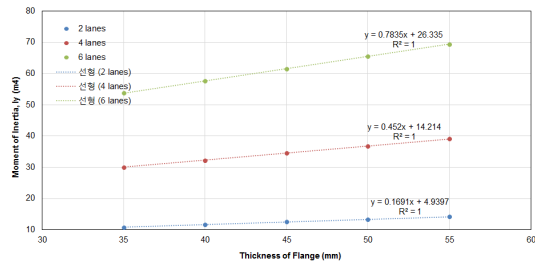
$$I_y^{6-lanes} = 0.7835t + 26.335 \quad (3c)$$



(a) Cross-Sectional Area



(b) Moment of Inertia (I_x)

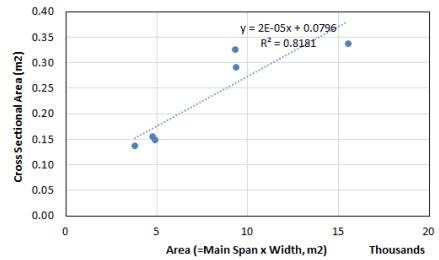


(c) Moment of Inertia (I_y)

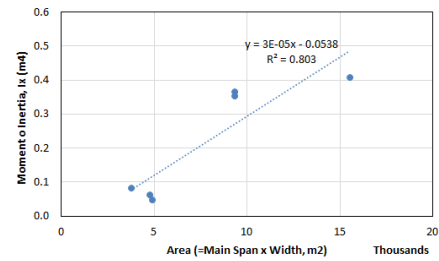
Fig. 2. Trend of geometric properties according to change of flange thickness

여기서, A 는 단면적, I_x 는 수평축을 기준으로 하는 단면 2차 모멘트, I_y 는 수직축을 기준으로 하는 단면 2차 모멘트, t 는 상하부 플랜지의 두께를 의미한다. 한편, 앞서 조사된 기존 사례에 대하여 추출된 단면강성을 보강

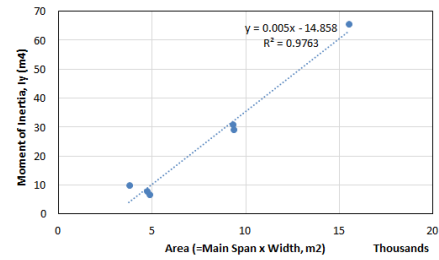
형 거더의 주경간장과 전체 폭원에 대하여 나타내면 Fig. 3과 같고, 이로부터 새로운 추세선 식을 도출하여 식(4), (5), (6)에 나타내었다.



(a) Cross-Sectional Area



(b) Moment of Inertia (I_x)



(c) Moment of Inertia (I_y)

Fig. 3. Trend of geometric section properties of the existing bridges

$$A = 0.00002x + 0.0796 \quad (4)$$

$$I_x = 0.00003x - 0.0538 \quad (5)$$

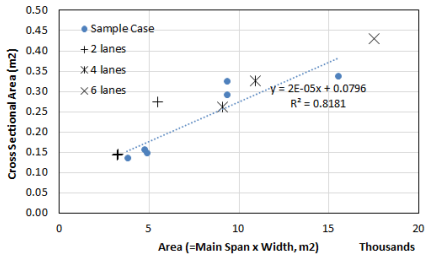
$$I_y = 0.005x - 14.858 \quad (6)$$

위와 같이 도출된 식(4)부터 (6)을 다시 식(1)부터 (3)에 대입하고 두께 t 에 대하여 정리하면 각 차로(폭원)별로 t 는 Table 2에 나타난 바와 같이 총 3개의 식으로부터 유추될 수 있고, 개발시스템에서는 각 차로별로 유추된 t 값 중 최대값을 사용한다. 유추된 t 에 의해 기본단면이 가질 수 있는 강성을 기존 사례와 비교하여 Fig. 4에 각각 나타내었다. Fig.에서 보듯이, 시스템에서 자동으로

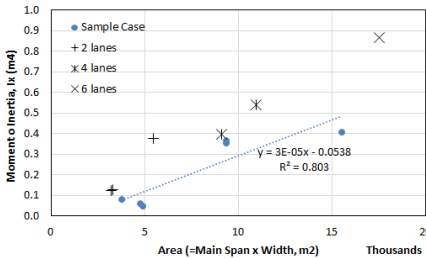
정해진 t 는 주로 I_y 에 의해 결정되고 이에 따라 단면적과 I_x 는 기존의 사례보다 큰 값을 확보하는 형태로 나타난다.

Table 2. Determination of flange thickness of composite I-girder for cable-stayed bridge

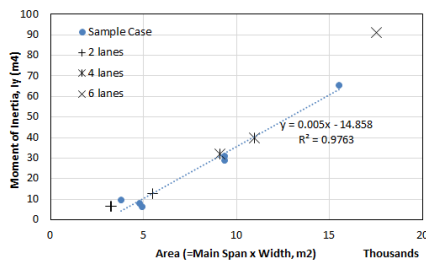
Lanes	Section Properties	Numerical Formula of Trend Line	Note
2	A	$t_1 = (0.00002x - 0.0287)/0.0037$	Max(t_1, t_2, t_3)
	I_x	$t_2 = (0.00003x - 0.1097)/0.0072$	
	I_y	$t_3 = (0.005x - 19.7977)/0.1691$	
4	A	$t_1 = (0.00002x - 0.0367)/0.0037$	Max(t_1, t_2, t_3)
	I_x	$t_2 = (0.00003x - 0.1249)/0.0083$	
	I_y	$t_3 = (0.005x - 29.072)/0.452$	
6	A	$t_1 = (0.00002x - 0.0447)/0.0037$	Max(t_1, t_2, t_3)
	I_x	$t_2 = (0.00003x - 0.1422)/0.0094$	
	I_y	$t_3 = (0.005x - 41.193)/0.7835$	



(a) Cross-Sectional Area



(b) Moment of Inertia (I_x)



(c) Moment of Inertia (I_y)

Fig. 4. Comparison on geometric section properties of the existing bridges and basic section (Fig.1)

2.2 케이블

사장교 사재 케이블은 Lewis [1]에 의해 제시된 식 (7), (8)을 적용하여 그 물량을 산출하였다. 이와 관련된 개념도 및 좌표계와 주요변수는 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

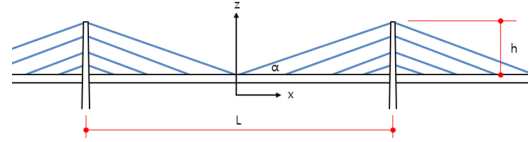


Fig. 5. Basic geometry of cable stayed bridge

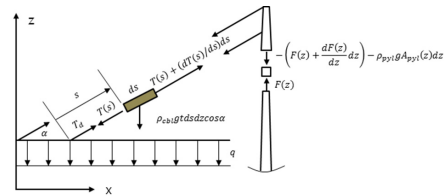


Fig. 6. Basic geometry of cable stayed bridge

$$V_{cbl,stay} = 2 \times \frac{1}{2} L h t = \frac{q h L}{\sigma_t} \left(\frac{1}{2} t^{non-dim} \right) \quad (7)$$

$$= \frac{q L^2}{\sigma_t} \frac{1}{r} \left(\frac{1}{2} t^{non-dim} \right)$$

$$\bar{V}_{cbl,stay} = \beta \times V_{cbl,stay} \quad (8)$$

여기서, $t^{non-dim} = \frac{1}{\sin^2 \alpha - \frac{\rho_{cbl} g h}{\sigma_t}}$

$$\sin \alpha = \frac{2h}{\sqrt{4h^2 + L^2}}$$

q : 등분포 하중 (보강형의 단위 m당 무게+등분포 활하중)

h : 거더부터 주탑 상부 높이

L : 중앙 경간장

r : L/h

σ_t : 케이블의 최대작용하중

실제 교량의 케이블 단면적과 Lewis [1]에 의한 이론식에 의한 결과값을 비교한 결과 그 차이가 대략 30% 정도 차이가 발생하였으나, 교량규모(Bridge Area)에 따른 전반적인 변화추이는 유사하게 나타났다. Lewis의 수식에 대해 본 연구에서는 보정계수(β)를 도입하고, 이에 대해 0.7를 적용하였다.

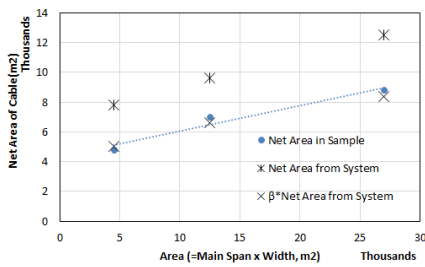


Fig. 7. Net area of cable

3. 시스템 인터페이스 설계 및 구현

본 연구에서는 케이블 교량의 3차원 개념설계(모델링) 및 수량산출을 위해 Bentley사의 MicroStation V8i (Select Series 3)를 기반으로 기 설계된 사장교 데이터를 분석하여 Parametric Modeling이 가능토록 BIM 시스템을 개발하였다. 개발시스템은 크게 3차원 모델을 생성하기 위한 Wizard 모듈, 단가 D/B 및 Wizard에 사용된 Parameter를 관리하기 위한 D/B 관리 모듈, 그리고 구조해석 모델생성 및 2D 일반도 생성 모듈로 구성된다. 구동메뉴로는 W, A, Q, D, S가 있으며, W에서는 교량의 경간구성, 폭원, 형식 그리고 보강형(거더)과 케이블, 주탑 본체 및 기초에 대한 단면제원, 그리고 마지막으로 접속교에 대해 정의하고, 이를 통해 교량을 모델링한다. A에서 엔지니어에 의한 구조검토가 가능하도록 STAAD 및 MIDAS/Civil용 구조해석 모델을 생성한다. Q에서는 수량 및 내역서를 작성하고, D에서는 교량의 주요부재에 대한 일반도를 AutoCAD 형식으로 출력한다.

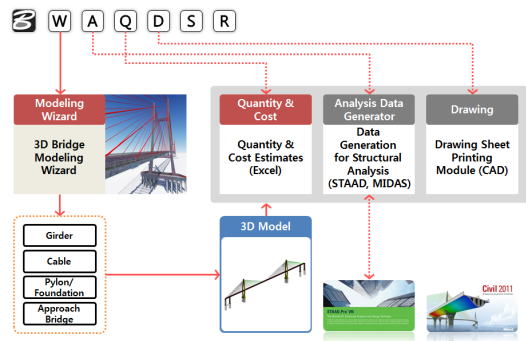


Fig. 8. Outline of development system

그 외 S는 시스템 환경설정을, R은 새로운 모델링 수행을 위한 Reset 기능을 수행한다. 개발시스템의 전체기능을 개략적으로 나타내면 Fig. 8과 같다[2].

2주탑 3경간 케이블교량을 기본모델로, Fig. 9와 같이 개발한 시스템의 Wizard를 통해 교량의 전체 치간장 및 중앙 경간장, 차로수(폭원) 등의 기본제원을 입력하고, 보강형(주형 또는 거더) 및 케이블, 주탑, 기초에 대한 제원을 차레대로 입력함으로써, 손쉽게 교량모델을 구현할 수 있다. 이 때, 앞서 설명한 바와 같이 기존 설계자료를 토대로 보강형, 케이블, 주탑, 기초 등의 단면제원을 시스템에서 자동으로 산정하여 초기치로 제공하며, 사용자는 필요에 따라 수정이 가능토록 하였다. 그 이외의 보강형의 경우 강상자형, 강합성 I형, PSC Box형을, 케이블의 경우 MS, PWS 방식을, 주탑의 경우는 A형과 H형을, 기초는 케이슨 기초와 말뚝 기초 등 주요 형식은 제공하며 사용자에게 의해 선택되어진다.

이렇게 구현된 3차원 교량모델로부터 주요 부재에 대

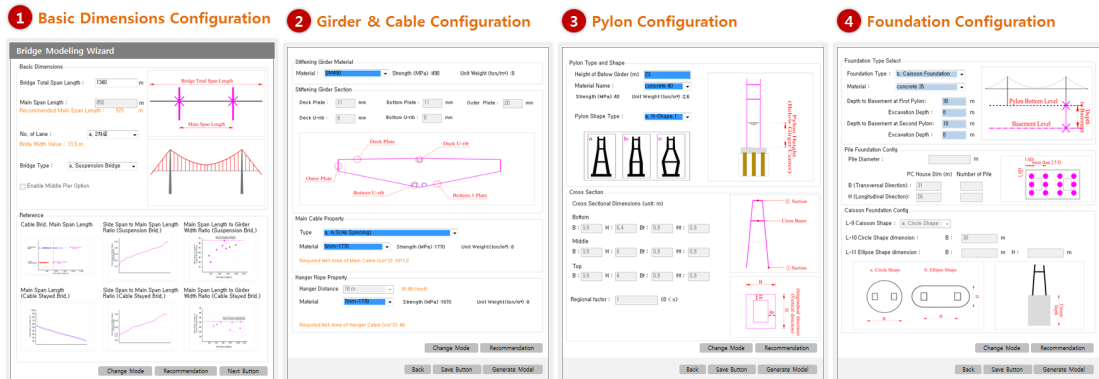


Fig. 9. Wizard's user interface of system

해 케이블공, 상부공, 주탑공, 하부공별로 수량을 산출하며, 케이블 교량에 대한 단가 D/B와 연계시 즉각적인 개략공사비 산정이 가능하다.

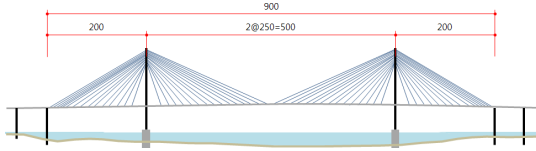


Fig. 10. Example of cable-stayed bridge

개발된 시스템을 실제 완공된 OO대교(Fig. 10)를 대상으로 시범 적용하였다. 시스템에서 산출된 물량을 기존 설계 내역서의 물량과 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 주탑에서 콘크리트 물량의 경우 18%가 낮게 평가되었고, 거푸집의 경우 18%의 오차를 보였다. 특히, 주탑 물량에 대하여 오차가 발생하는 원인은 다음과 같이 크게 두 가지를 들 수 있다.

- (1) 실제 설계된 주탑의 단면은 다각형인 반면, Wizard에서 지원단면은 사각형으로 제한
- (2) 실제 설계된 주탑의 중간 부위에 격벽이 존재하나 Wizard에서 격벽 미지원

또한, 우물통 물량의 경우 설계에서는 직사각형 형태에 격벽이 존재하였지만 Wizard 상에서는 타원형의 내부가 채워진 형태이므로 기존 설계 내역보다 10%의 볼륨 오차를 보였다. 케이블의 경우 10%가 낮게 평가되었는데 이는 실제 설계 내역에서 케이블의 총 개수는 120개였으나 Wizard를 통해 산출된 케이블의 개수는 104개로서 현재 일반적으로 케이블을 균등하게 배치함에 따라 차이가 발생하였다.

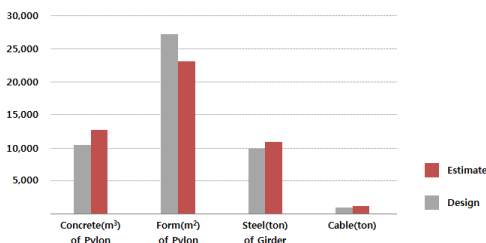


Fig. 11. Material quantity comparison

교량, 특히 케이블교는 설계자의 설계의도에 따라 교

량의 전체 컨셉이 크게 다르고, 결과적으로 교량 전체 물량에 적지 않은 차이가 발생하기 때문에 실 설계자료와의 물량오차는 불가피하다. 단, 케이블교의 예비타당성 조사단계에서 파라메트릭 모델링 기능을 통해 설계자의 설계의도를 최대한 반영한 교량모델을 자동생성하고, 즉각적인 수량산출을 통해 개념설계 및 대안검토가 가능함으로써, 설계업무의 효율성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

3. 결론

건축분야와 같이 토목분야에서도 사업리스크를 줄이기 위한 관리체계의 일환으로서, BIM(Building Information Modeling)을 단순히 2D 도면을 3D 모델로 작성하는 도구로서가 아니라 엔지니어링 정보와의 연계성을 높이면서 3D 정보의 활용성을 극대화하는 응용기술로서의 개발이 활발히 진행되고 있다.

그 일환으로, 일반교량과는 달리 엔지니어링 기반이 수반되어야 하는 케이블 장대교량에 대하여 기존의 설계 사례 D/B를 기반으로 BIM 교량모델을 자동으로 생성하고, 생성된 모델기반 데이터로부터 수량 및 비용산출, 도면 생성 및 가상시뮬레이션에 의한 경관분석 등을 일괄 지원하는 시스템을 개발하였다. 이로써, 사업기획 및 입찰단계에서는 대안별 m당 혹은 m²당 개략 공사비 산출에 따른 한계 즉, 시설물의 요구조건 및 현황을 제대로 반영할 수 없고, 각 부위별 공사비를 추정하고 조율하기에는 산출된 정보의 부족 등에 따른 한계를 상당히 극복할 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구에서는 기획단계에서 현장 여건에 영향을 많이 받는 토목공사 시설물 중 장대교량의 개념설계와 개략공사비 산정에 BIM을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) BIM Model에서 자동 산출된 주요 물량을 기반으로 직접공사비 산정에 활용될 대표공종에 대한 수량을 신속히 산출할 수 있었다.
- (2) 다만 제한적인 개념설계 방식에 의하였으므로 실제 설계에 의한 물량과 오차 발생은 불가피하였으며, 추후 유사교량의 실적공사비와 비교하여 비용 산정 시 수량보정이 필요한 것으로 분석되었다.

- (3) 부재의 형상 라이브러리를 구축함으로써, 부재의 대표 단면의 초기치를 기존의 사례 D/B를 기반으로 결정하는 파라메트릭 모델링이 가능함을 보였다.

무엇보다, 2D 도면 작성과정 없이 개념설계가 진행되는 첫 사례로서 기존 BIM 데이터가 2D 도면이 존재하여야 구축이 가능했던 한계를 한 단계 벗어나는 진일보된 형태의 BIM 응용기술로 평가할 수 있다. 향후, 국내의 장대교량 EPC 입찰 및 개발사업 수주지원을 추진코자, 입찰예정 프로젝트에 우선 시범적용을 통해 그 완성도, 그 활용도를 지속적으로 높여나갈 계획이다.

Acknowledgement

본 연구에 큰 도움을 준 공동연구기관인 (주)태성에스엔아이에 깊은 감사드립니다.

References

- [1] Lewis, W.J., "A Mathematical Model for Assessment of Material Requirements for Cable Supported Bridges: Implications for Conceptual Design," *Engineering Structures*, Vol. 42, pp. 266-277, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.018>
- [2] Kim B.G., Kim C.H., Ko Y.K., Chun K.S., Choi C.H., "A BIM Wizard for Approximate Cost Estimation of Cable Bridges," *Korean Society of Civil Engineers(KSCE)*, Proceeding of the Annual Conference of the KSCE, 2014.

천 경 식(Kyoung-Sik Chun)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2005년 8월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2004년 9월 ~ 2011년 11월 : (주)바우컨설팅 기술연구소 차장
- 2011년 12월 ~ 현재 : (주)포스코건설 R&D센터 책임연구원

<관심분야>

복합재료, 구조해석, 교량설계, BIM, 케이블 건전성/진동성 평가

박 원 태(Won-Tae Park)

[정회원]



- 1983년 2월 : 부산대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 건설환경공학부 정교수

<관심분야>

구조공학, 복합재료, 좌굴해석, 비선형 구조해석, 동적해석, 나노구조의 해석