



## 사업기획단계에서의 현수교의 물량추정을 위한 모델연구

박원태<sup>1</sup> · 천경식<sup>2</sup>

공주대학교 건설환경공학부 교수<sup>1</sup>, 포스코건설 R&D센터 책임연구원<sup>2</sup>

### Estimation Model for Approximate Construction Quantities of Suspension Bridge in Early Stage

Park, Weon-Tae<sup>1</sup> · Kyoung-Sik Chun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University, Chungnam, Korea  
<sup>2</sup>Senior Researcher, R&D Center, POSCO Engineering & Construction, Incheon, Korea

**Abstract:** Bridge construction cost estimates have generally been conducted by using historical unit-price(per meter or square meter). The traditional estimating method based on unit-price references can never completely reflect the specialty of cable supported bridge. In this paper, we have 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 suspension bridge with 2-pylons. First of all, we'd analyzed the design information (such as structural design report, blueprint and quantity) and the real cost data from the existing suspension bridges and derived the design variables of the bridges. We developed the BIM wizard that generates a suspension bridge model parametrically based on derived design variables. The principle material quantities of suspension bridge are calculated directly from 3-dimensional bridge model built by using the BIM wizard. We have established the system that the construction cost can be estimated more specific than the traditional estimating method.

**Key Words:** suspension bridge, construction quantities, pre-project planning phase, 3D bridge model, BIM wizard

#### 1. 서론

국내외 도로건설사업은 사업기획 및 입찰단계에서 수주 경쟁력 강화를 위해 주요 구조물에 대한 다양한 대안검토가 필수이다. 특히, 사장교, 현수교와 같은 케이블교는 대안별로 기본적인 구조해석과 수량 산출을 위한 기본도면을 작성하고 물량을 산출해야한다. 이러한 절차는 막대한 시간과 비용이 투입된다. 이에, 사업개발 초기에는 과거 실적 데이터에 기반한 평균 단가를 기준으로 m당 혹은 m<sup>2</sup>당 실적 공사비를 통해 공사비를 산출하는 방법이 일반적이다. 그러나 이와 같은 개략적인 공사비 산출 방법은 시설물의 요구조건 및 현황을 반영할 수 없고, 각 부위별 공사비를 추정하고 조율하기에는 산출된 정보에 한계가 있다.

이에 대해, 실제 교량공사에서 투입되는 실적 공사비 데이터 및 공종별 원가자료를 기반으로 전체 공종 내역 중 공사비 누적비율 대비 95%이상을 차지하는 대표적인 공종을 도출하고, 상부면적당 대표공종기반 단위물량 및 차로수별 공사비 단가를 제시함으로써, 이를 활용하여 교량형식별로 상부면적당 공사비를 추정하는 모델이 개발되었으며(Kim and Cho, 2013), 기획단계의 가용정보를 기반으로 공사비 영향인자를 도출하고, 사례기반추론기법을 활용해 신뢰도가 높은 교량공사비 추론모델을 제시하는(Kim, 2010) 등의 대표적인 연구가 있다.

본 연구에서는 더 나아가 기획단계에서 기존 설계 데이터를 활용해 3차원 교량모델을 구축하고, 구축된 모델로부터 대표공종에 대해 주요물량을 산출하는 방

**주요어:** 현수교, 공사물량, 사전 프로젝트기획단계, 3차원 교량모델, BIM Wizard

**Corresponding author:** Chun, Kyoung-Sik

Senior Researcher, Infra Research Group, R&D Center, POSCO Engineering & Construction, Incheon, Korea  
 Tel: +82-32-748-3138, Fax: +82-32-748-4033, E-mail: chunkspe@poscoenc.com

Received October 8, 2015 / Revised November 3, 2015 / Accepted November 5, 2015

식으로써 BIM 기반의 공사물량 예측시스템 개발을 목표로 하였다. 이를 위해 기 설계된 케이블교의 설계 정보를 분석하여 Parametric Modeling이 가능한 BIM Wizard를 개발하였다(Kim et al., 2014; Chun and Park, 2015). Wizard로 구축한 3차원 교량모델로부터 주요부재(케이블, 보강형 및 주탑)의 수량을 산출하고, 케이블 교량에 대한 단가 D/B와 연계하여 물량기반의 개략공사비를 산정할 수 있다. 이로써 종래 사업 초기 단계에서 m당 혹은 m<sup>2</sup>당 실적 평균공사비를 산출하는 방식과 비교하여 보다 구체화된 개략공사비를 산출할 수 있고, 신속하게 다양한 대안을 검토할 수 있는 기반을 제공할 수 있다.

## 2. 주요 부재별 단면설정

본 연구에서는 교량의 주요부재(케이블, 보강형, 주탑 등)에 대하여 기본단면을 폭원별로 정의하고, 기본 단면에 대한 세부제원은 기존 설계자료를 분석하여 단면강성에 대한 추세를 도출, 이를 기반으로 교량 규모에 따라 적정 단면강성을 갖는 기본단면의 크기(치수)를 파라메트릭 방식으로 결정하였다. 이를 위해 참고한 현수교의 기본제원은 Table 1과 같다. 설계자료 확보의 어려움으로 인해, 제한적인 설계자료에 근거하여 단면형상을 유추하고 있는바 개발시스템을 범용적으로 입찰단계에 적용하기에는 한계가 있음을 우선 밝힌다. 다만, 기존 설계자료에 근거하여 적정 단면형상을 자동도출하고, BIM 3-D 모델링을 구현할 수 있는 기반을 마련하였고, 앞으로 D/B를 지속적으로 보완하여 개선해나갈 계획이다. 본 논문에서는 현재까지 진행된 연구내용중 일부 강상자형 거더를 갖는 현수교에 대해 그 개발내용을 다음과 같이 간단히 기술한다.

Table 1. Existing Design Data of Suspension Bridge

Bridge No.	Total Span	Main Span	Width	Pylon's Total Height
1	470	250	12.7	87.4
2	1,130	750	12.8	131
3	2,260	1,545	27.0	270

### 1. 보강형(거더)

국내 현수교에 사용된 강상자형 거더의 주요 단면제원을 정리하면 Table 2와 같다. Table 2에서 "System Value"는 본 연구에서 개발한 시스템에 사용하는 기본단면의 두께를 의미한다. 강상자형 측면의 웨브(Web) 두께는 20mm로 정하였으며, 상·하부 플랜지(Flange)를 보강하는 U-rib의 경우 모두 8mm로 정의하였다. 그 외 상·하부 플랜지 두께는 가변요소로

정의하였다. 가변요소는 설계사례에서 알 수 있듯이 교량 규모, 즉 최대경간장과 폭원에 따라 달라지는 값으로써, 기존 설계사례를 기반으로 도출한 단면강성에 대한 추세를 기준으로 다음 절차에 따라 교량규모별 적정 단면강성을 갖도록 시스템내에서 자동산정하고, 이를 초기치로 사용한다.

Table 2. Current Status of Steel Box Girder

Bridge No.	Flange Thickness		Web	U-rib	
	Upper	Lower		Upper	Lower
1	14.0	14.0	20	8	20
2	16.5	15.0	18	8	8
3	14.0	10.0	30	8	6
System Value	Var.	Var.	20	8	8

- (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.

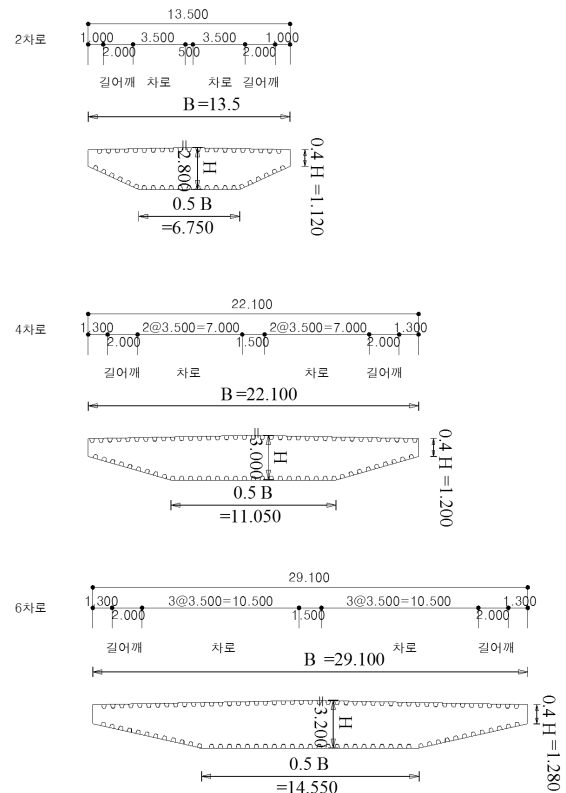


Fig. 1 Basic Section of Steel Box Girder

Fig. 1은 Table 2를 기반으로 본 연구에서 강상자형 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 추세선은 식(1), (2), (3)과 같다.

$$A^{2-lanes} = 0.0277t + 0.2933 \quad (1a)$$

$$A^{4-lanes} = 0.0447t + 0.4656 \quad (1b)$$

$$A^{6-lanes} = 0.0587t + 0.5815 \quad (1c)$$

$$I_x^{2-lanes} = 0.0422t + 0.3009 \quad (2a)$$

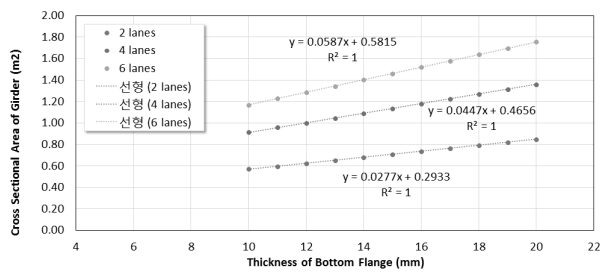
$$I_x^{4-lanes} = 0.0768t + 0.5597 \quad (2b)$$

$$I_x^{6-lanes} = 0.1130t + 0.8097 \quad (2c)$$

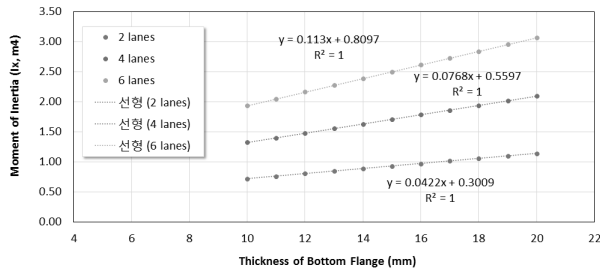
$$I_y^{2-lanes} = 0.4318t + 5.4980 \quad (3a)$$

$$I_y^{4-lanes} = 1.8406t + 22.719 \quad (3b)$$

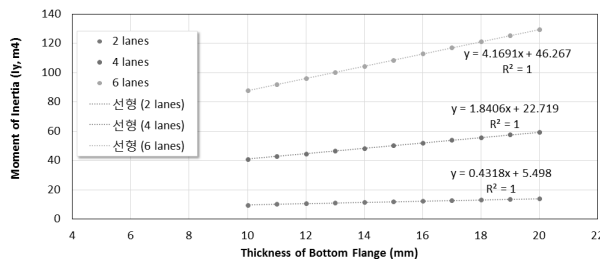
$$I_y^{6-lanes} = 4.1691t + 46.267 \quad (3c)$$



(a) Cross-Sectional Area



(b) Moment of Inertia (Ix)



(c) Moment of Inertia (Iy)

Fig. 2 Trend of Geometric Properties According to Change of Flange Thickness

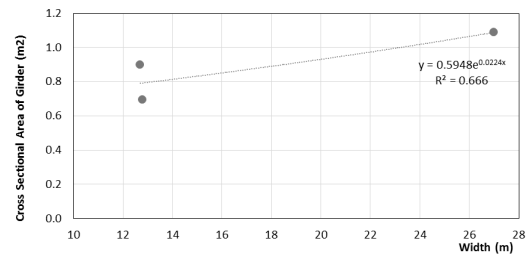
여기서, A는 단면적, I<sub>x</sub>는 수평축을 기준으로 하는 단

면 2차 모멘트, I<sub>y</sub>는 수직축을 기준으로 하는 단면 2차 모멘트, t는 상하부 플랜지의 두께를 의미한다. 한편, 앞서 조사된 기존 사례에 대하여 추출된 단면강성을 보강형 거더의 주경간장과 전체 폭원에 대하여 나타내면 Fig. 3과 같고, 이로부터 새로운 추세선 식을 도출하여 식(4), (5), (6)에 나타내었다.

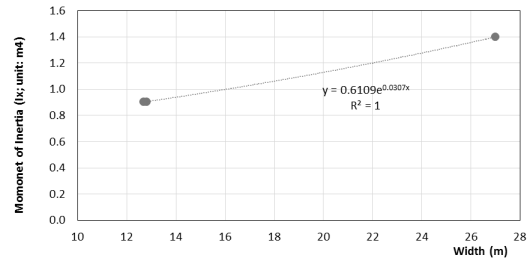
$$A = 0.5948 \times e^{0.0224x} \quad (4)$$

$$I_x = 0.6109 \times e^{0.0307x} \quad (5)$$

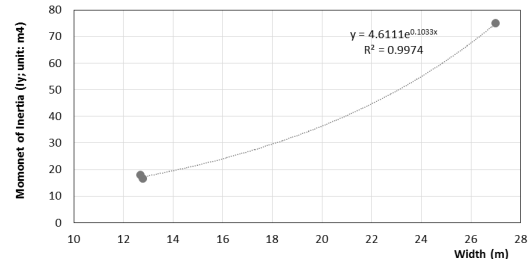
$$I_y = 4.6111 \times e^{0.1033x} \quad (6)$$



(a) Cross-Sectional Area



(b) Moment of Inertia (Ix)



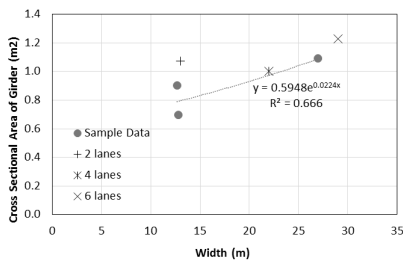
(c) Moment of Inertia (Iy)

Fig. 3 Trend of Geometric Section Properties of the Existing Bridges

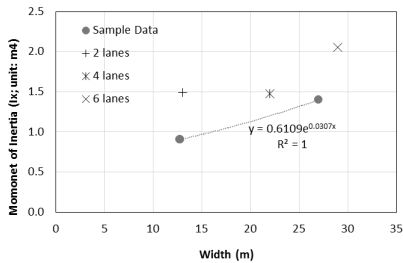
위와 같이 도출된 식(4)부터 (6)을 다시 식(1)부터 (3)에 대입하고 두께 t에 대하여 정리하면 각 차로(폭원)별로 t는 Table 3에 나타낸 바와 같이 총 3개의 식으로부터 유추될 수 있고, 개발시스템에서는 각 차로별로 유추된 t값 중 최대값을 사용한다. 유추된 t에 의해 기본단면이 가질 수 있는 강성과 기존 사례에 대한 비교를 Fig. 4에 각각 나타내었다. Fig. 4에서 보듯이, 시스템에서 자동으로 정해진 t는 주로 I<sub>y</sub>에 의해 결정되고 이에 따라 단면적과 I<sub>x</sub>는 기존 사례보다 큰 값을 확보하는 형태로 나타난다.

**Table 3. Determination of Flange Thickness of Steel Box Girder for Suspension Bridge**

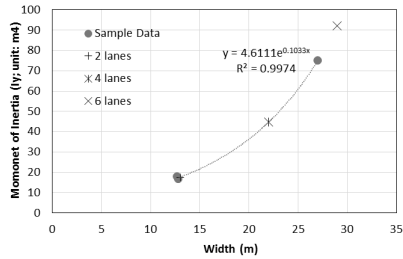
Lanes	Section Properties	Numerical Formula of Trend Line	Note
2	$A$	$t_1 = (0.5984 \times e^{0.0224x} - 0.2933) / 0.0277$	$\text{Max}(t_1, t_2, t_3)$
	$I_x$	$t_2 = (0.619 \times e^{0.0307x} - 0.3009) / 0.0422$	
	$I_y$	$t_3 = (4.6111 \times e^{0.1033x} - 5.4980) / 0.4318$	
4	$A$	$t_1 = (0.5984 \times e^{0.0224x} - 0.4656) / 0.0447$	$\text{Max}(t_1, t_2, t_3)$
	$I_x$	$t_2 = (0.6109 \times e^{0.0307x} - 0.5597) / 0.0768$	
	$I_y$	$t_3 = (4.6111 \times e^{0.1033x} - 22.719) / 1.8406$	
6	$A$	$t_1 = (0.5984 \times e^{0.0224x} - 0.5815) / 0.0587$	$\text{Max}(t_1, t_2, t_3)$
	$I_x$	$t_2 = (0.6109 \times e^{0.0307x} - 0.8097) / 0.1130$	
	$I_y$	$t_3 = (4.6111 \times e^{0.1033x} - 46.267) / 4.1691$	



(a) Cross-Sectional Area



(b) Moment of Inertia ( $I_x$ )



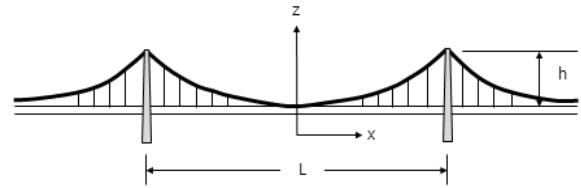
(c) Moment of Inertia ( $I_y$ )

**Fig. 4 Comparison on Geometric Section Properties of the Existing Bridges and Basic Section (Fig.1)**

**2. 케이블**

현수교의 주케이블 전체 볼륨(Volume)은 Lewis (2013)에 의해 제시된 식 (7)을 적용하여 산출하였다. 이와 관련된 개념도 및 좌표계와 주요변수는 Fig 5와 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 7은 실제 교량의 주케이블 단면적과 이론식에 의한 결과값을 비교하여 나타낸 것이다. 이때, 이론식에서는 주케이블이 가져야 하는 전체 부피가

나오는데 실제사례에서는 주케이블의 총 길이를 고려하여 소요 단면적을 계산하였다.



**Fig. 5 Basic Geometry of Suspension Bridge**

$$V_{cbl,susp} = \frac{qhL}{\sigma_t} \left\{ \frac{\sqrt{b}}{2 \left( a - \rho_{cbl}g \left( \frac{L}{2\sigma_t} \sqrt{b} \right) \right)} \frac{L^2}{8h^2} (\ln[a + \sqrt{b}] + a\sqrt{b}) \right\} \quad (7)$$

여기서,  $a = \frac{4h}{L}$ ,  $b = 1 + \left( \frac{4h}{L} \right)^2$

$q$  : 등분포 하중

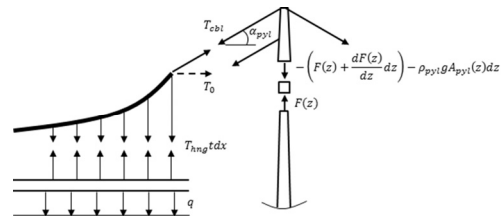
(보강형의 단위 m당 무게+등분포 활하중)

$h$ : 거더부터 주탑 상부 높이

$L$ : 중앙 경간장

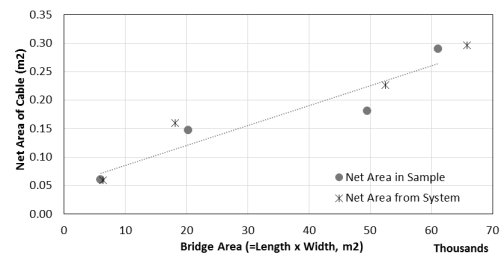
$r$ :  $L/h$

$\sigma_t$ : 주케이블의 최대작용하중



**Fig. 6 Basic Geometry of Suspension Bridge**

실제 설계, 시공된 교량의 케이블 단면적과 Lewis (2013)에 의한 결과값을 비교한 결과 근사한 분포경향을 나타내며, 그 적용함에 있어 타당함을 확인하였다.



**Fig. 7 Net Area of Cable**

본 연구에서는 상부공과 케이블공에 대해서만 간단히 기술하였지만, 현수교에 대해 주탑공, 케이블공, 상부공, 앵커리지공 등으로 공종을 대분류하였다. 그리고 대분류내에 포함되어야 하는 세부 공종들로서 각 세부 공종이 차지하는 비용이 전체 공종에 영향을 미치는 것이

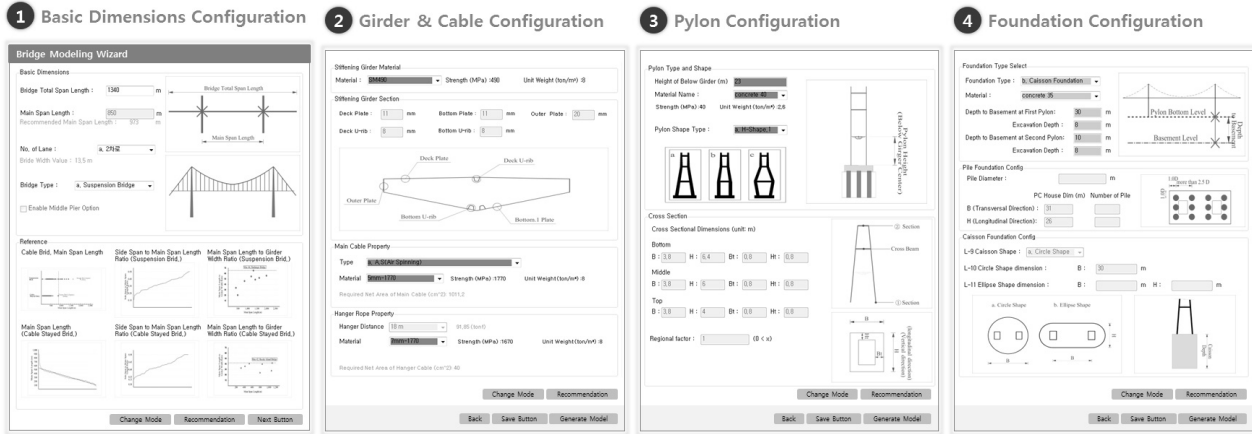


Fig. 8 Wizard's User Interface of System

1% 이상인 공종들을 1차로 추출하였다. 이후 1차 추출된 공종들을 기준으로 그 하위 공종의 대표 공종을 분류하는 작업을 동일하게 수행하였으며, 3차까지 분류하여 수량산출을 위한 내역서의 세부항목을 결정하였다.

### 3. 시스템 인터페이스 설계 및 구현

본 연구에서는 케이블 교량의 3차원 개념설계(모델링) 및 수량산출을 위해 수학적 추정모델을 제시하였으며, 이를 기반으로 Bentley사의 MicroStation V8i (Select Series 3)로 Parametric Modeling이 가능토록 BIM Wizard를 개발하였다.

2주탑 3경간 케이블교량을 기본모델로, Fig. 8과 같이 BIM Wizard를 통해 교량의 전체 지간장 및 중앙 경간장, 차로수(폭원) 등의 기본제원을 입력하고, 보강형(주형 또는 거더) 및 케이블, 주탑, 기초에 대한 제원을 차례대로 입력함으로써, 손쉽게 교량모델을 구현할 수 있다. 이렇게 구현된 3차원 교량모델로부터 주요 부재에 대해 케이블공, 상부공, 주탑공, 하부공별로 수량을 산출하며, 케이블 교량에 대한 단가 D/B와 연계시 즉각적인 개략공사비 산정이 가능하다.

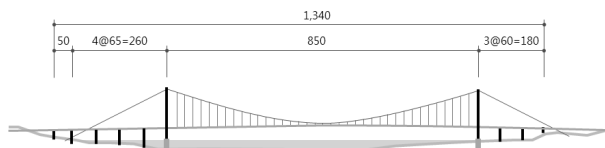


Fig. 9 Example of Suspension Bridge

Wizard를 실제 완공된 OO 연륙교(Fig. 9)를 대상으로 시범 적용하였다. 총 교장 1,340m에 대해 개발시스템에서는 측정간비 0.425를 적용하여 중앙경간장이 724m로 산정되지만, 실제 설계된 내용에 따라 850m를 입력하였다. Wizard를 통해 산출된 물량을 기존 설계 내역서의 물량과 비교하여 Fig. 10에 나타내었다.

주탑구체는 콘크리트 볼륨의 경우 6%, 거푸집 면적은 12%가 각각 높게 평가되었다. 우물통 기초의 경우 전체 볼륨이 3% 낮게, 그리고 외부의 표면적은 8% 높게 측정되었다. 전체적으로 거푸집 면적이 콘크리트 볼륨보다 오차가 크게 산정되었다. 케이블의 경우 설계내역서상에 나타난 값과 비교하여, 길이 측면에서 주케이블이 4%, 행어가 8% 높게 평가되었으며, 무게 측면에서 주케이블이 7%, 행어는 6%가 높게 평가되었다.

이로써, 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 있음을 확인하였다.

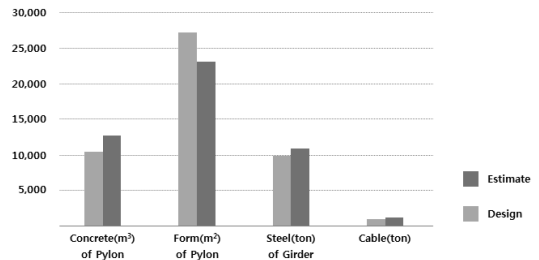


Fig. 10 Material Quantity Comparison

### 4. 결론

일반교량과는 달리 엔지니어링 기반이 수반되어야 하는 케이블 장대교량에 대하여, 기존 설계사례 D/B에 기반한 수학적 모델과 이를 활용한 BIM Wizard로 사용자는 손쉽게 교량모델을 자동으로 생성하고, 생성된 모델로부터 수량산출을 지원받을 수 있다. 장대교량의 개념설계와 개략적인 물량산출에 BIM을 이용함으로써, 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, 부재별 대표단면 초기치를 기존의 사례 D/B를 기반으로 결정하는 파라메트릭 모델링이 가능함을 보였다.

다만, 사장교, 현수교와 같이 특수교량은 가설조건(육상, 해상) 및 가설공법에 따라 공사비가 크게 좌우되기 때문에, 공사비 추정을 위한 기초자료로써 면적이나 체적 단위로 산출한 주요자재의 물량만으로는 실질적인 공사비 추정에 있어 한계가 분명하다. 교량공사비는 공법과의 연계성이 매우 높은 만큼, 기존사례의 공정별 주요물량뿐만 아니라 가설공법(시공법)도 함께 고려될 수 있도록 개선해야겠다. 아울러 향후, 기완공되었거나 입찰예정인 교량 프로젝트에 시범적용하여 그 완성도, 그 활용도를 지속적으로 높여나갈 계획이다.

## References

- Chun, K.S. and Park, W.T. (2015), "BIM System Development for Conceptual Design and Pre-Feasibility Study of Cable-Stayed Bridge," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 16, No. 10, pp. 7204-7210. (in Korean).
- Kim, B.G., Kim, C.H., Ko, Y.K., Chun, K.S. and Choi, C.H. (2014), "A BIM Wizard for Approximate Cost Estimation of Cable Bridges," *Korean Society of Civil Engineers(KSCE), Proceeding of the Annual Conference of the KSCE*. (in Korean).
- Kim, S.B. and Cho, J.H. (2013), "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 Engineer*, Vol. 33, No. 2, pp. 791-800. (in Korean).
- Kim, M.J. (2010), A Study on the Model of Estimating Approximate Construction Cost by using Case-Based Reasoning Method, *Master Thesis*, Gyeong-sang National University. (in Korean).
- Lewis, W.J. (2013), "A Mathematical Model for Assessment of Material Requirements for Cable Supported Bridges: Implications for Conceptual Design," *Engineering Structures*, Vol. 42, pp. 266-277.