

창의적 사고력을 이용한 미학적 교량 설계

Aesthetic Bridge Design using Creative Thinking

김남희* · 고현무**

Kim, Namhee · Koh, Hyun-Moo

Abstract

Bridge design is a problem-solving process whose level of design quality strongly depends on how to relate design constraints with feasible design objectives in conceptual design stage. This paper has focused on how to create bridge shapes using creativity toward better looking bridge appearances in conceptual design stage. The term creativity in this study does not refer to the creation of something from nothing but to the reorganization of existing concepts. Such creativity includes not only enlarging the number of structural forms which is established based on the relationship between form and statics but also combining bridge design with artistic components like an architectural style. Also, this study has investigated the usefulness of graphic statics as a structural analysis tool showing the analysis results visually to generate bridge forms in conceptual design stage. It is expected that the proposed way of generating bridge forms in this study to be used not only for practical purpose but also for educational purpose regarding the aesthetic bridge design serving as a new education paradigm.

Keywords : *bridge appearance, conceptual design, creativity, structural form generation, form and statics, graphic statics*

요 지

교량설계문제란 주어진 조건을 만족하는 해를 찾아가는 과정이며, 설계결과와 질적 수준은 개념적 설계단계에서 문제의 제약 조건을 어떻게 합리적 설계대안으로 연계시키는지에 따라서 현저히 달라진다. 이 논문에서는 아름다운 교량형태를 위해서 창의적 사고력을 이용하여 정성적 교량설계 대안을 생성하는 개념적 설계를 위한 교량형태 생성방법에 주안점을 둔다. 이 연구에서 창의력은 무에서 유를 창조하는 것이 아니라 기존 개념들의 재구성을 의미한다. 이러한 창의력은 역학적 힘과 형태와의 관계를 토대로 이루어지는 구조시스템의 생성질서를 확장시키는 것뿐만 아니라, 건축양식과 같은 예술적 요소를 교량설계와 접목하는 것을 포함한다. 또한, 개념적 설계단계에서 교량형태 생성과정에 시각적 구조해석 결과를 보여주는 정력학적 도해법이 매우 효율적임을 살펴본다. 이 연구에서 제시하는 교량형태 생성방법은 실무자들에게뿐만 아니라 미학적 교량 설계 교육에 대한 새로운 교육모델로도 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

핵심용어 : 교량형태, 개념적 설계, 창의력, 구조형태 생성, 형태와 역학, 정력학적 도해법

1. 서 론

모든 설계문제는 주어진 조건을 만족하는 해를 찾아가는 과정이다. 해의 질적 수준은 개념적 설계단계에서 문제의 제약 조건과 그 조건에 적합한 초기 해를 연계시키는 방법에 따라서 현저히 달라진다. 그런데 문제의 조건이 비교적 간단하고 결과물의 실패에 따르는 위험성이 상대적으로 작은 설계문제의 경우는 그 해법을 찾을 때 자유로운 상상력을 쉽게 이용하여 초기 해를 가정하는 반면에, 문제의 조건이 까다롭고 넓은 범위의 공학적 기술력이 필요하며 결과물의 실패에 대한 위험도가 매우 높은 교량설계의 경우에는 다양한 초기 해의 가정이 현실적으로 매우 어렵다. 이러한 맥락에서 교량설계의 발전은 주로 공학적 기술에만 의존하

여 편협적으로 발전해 오고 있으며, 국내외적으로 대학교육 또한 공학적 설계와 구조해석 중심의 교육으로 구성되어 있다. 따라서 이러한 대학교육을 받은 기술자가 실무에서 창의적 능력이 필요한 문제를 해결하는데 수동적 사고방식을 보이는 것은 필연적 귀결이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서, 최근 상징성이 강조되는 교량설계, 또는 장경간 교량 설계에서는 예술적 요소를 표현할 수 있는 전문가와 협력하여 아름다운 교량형태를 설계하는 노력을 경주하고 있는 까닭에 국내외적으로 아름다운 교량이 탄생하고 있는 점은 다행이다. 더 나아가 미학적이고 창의적인 설계분위기를 대학교육으로 이어지게 하기 위해서 세계 우수대학에서는 교과과정을 전면적으로 또는 부분적으로 설계교육에 대한 변화를 모색하고 있다(Dym *et al.*, 2005, Schlaich 2006). 무엇보다

*정희원 · 교신저자 · 서울대학교 건축학과 객원교수 (E-mail : namheek@snu.ac.kr)

**정희원 · 서울대학교 건설공학부 교수 (E-mail : hmkoh@snu.ac.kr)

다도 개념적 설계와 프로젝트 형태의 학습을 강조하는 새로운 교육패러다임을 공통적으로 제시하고 있다. 이 논문은 아름다운 교량형태를 위해서 개념적 설계단계에서 가정하는 초기 설계대안 생성에 초점을 둔다. 특히 공학적 합리성이 매우 중요한 교량설계에서 창의적 사고력을 이용해서 새로운 교량형태로 발전시켜가는 방법을 제시하는 것이 연구목표이다. 먼저 이 연구에서 교량설계에 사용하고자 하는 창의력에 대해 정의한다. 새롭게 정의된 창의력 개념에 부합하는 교량형태 생성에 대한 주요 원리들을 제시한다. 교량형태 생성원리는 구조적 안전성과 시공가능성에 따라서 발전된 교량형태의 기본적 구조시스템을 이용하여 새로운 형태를 생성하는 방법뿐만 아니라, 자연적 여건과 사회·문화적 양식과 결합하는 방법, 비례와 조화의 미학적 원리를 이용하는 방법 및 자연형태의 의태적 모방법을 포함한다. 또한, 기본적 하중에 대한 구조적 안정성 확보를 우선시하는 개념적 설계단계에서 유용한 구조해석기법으로 정력학적 접근법인 도해법을 강조한다. 정력학적 도해법은 교량의 형태와 힘의 흐름을 서로 맞물려서 시각적으로 표현할 수 있으므로 구조적 힘의 흐름과 재료에 적합한 부재설계에 매우 효과적이기 때문이다. 이 연구에서 미학적 교량설계를 위해서 제시하는 일련의 방법들은 미학적 교량설계 교육에 대한 새로운 교육모델로 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. '창의력'과 문맥적 교량설계

사전적인 의미로 '창의력'은 새로운 생각이나 방안을 만들어 내는 힘이라고 정의한다. 이때 '새로운'이라는 단어 때문에 수 많은 교량설계자가 커다란 부담을 느끼게 된다. 왜냐하면 새로운 교량형태를 개발하려면, 이 새로운 형태에 대한 구조적 안정성, 시공적 가능성과 효율적 재료이용의 경제성을 모두 살펴본 후에야 실현가능한 교량형태의 구조시스템으로 인정받기 때문이다. 이 연구에서는 이러한 부담감을 줄

이기 위해서, '창의력'에 대한 개념을 기존의 생각이나 방안을 재구성해서 새로운 생각으로 발전시키는 것으로 정의한다. 따라서 지금까지 공학적으로 합리적이었다고 인정받는 구조시스템의 재구성 또는 동일한 구조시스템일지라도 지역이라는 새로운 문맥적 요소와의 결합으로 창의적 교량형태를 이름답게 생성할 수 있음을 의미한다.

이 연구에서 정의한 창의력을 이용한 교량설계는 교량자체만을 중점적으로 고려했던 기존 교량설계와는 달리 교량과 주변환경을 총체적으로 고려해서 설계하는 문맥적 교량설계법(김남희와 고현무 2006, 2007)을 이용한다. 그림 1은 기존의 문맥적 설계법의 흐름도에 교량형태의 구조적 합리성을 살펴볼 수 있는 단계를 보완한 것이다. 문맥적 설계법의 가장 큰 특징은 교량설계 초기부터 도로의 선형계획을 위한 지형특성뿐만 아니라 교량형태결정에 영향을 미칠 지역적 특성(예, 상업지역, 농업지역등)과 주변 건축물의 건축양식, 지역 사회의 문화적 특징을 고려하여, 교량설계를 위한 미학적 질서 원리를 설정하는 것이다. 또한, 설계 중간과정에 구조시스템에서 상세에 이르기까지 미학적 분석을 수행하여 설계초기에 설정한 미학적 질서원리가 일관성을 유지될 수 있도록 한다.

3. 새로운 교량형태 생성원리

자기만의 고유성을 높이고자 하는 욕구가 높을 때 새로운 교량형태는 필연적으로 개발된다. 개념적 설계단계에서는 이러한 고유성을 어디서 착안하여 어떻게 표현하는지에 따라서 설계결과가 확연히 달라진다. 교량이 세워질 교량의 지형적 여건과 주변 배경과의 문맥적 관계 및 문화적 요소를 고려하되, 각 교량설계에 요구되는 모든 조건을 최대한 이용하여 전체적 구조형상과 적합한 구조시스템을 선택하는 것이 가장 바람직하다. 전체적인 힘의 흐름을 고려해서 세부적으로 힘의 흐름과 미학적 비례원리를 이용해서 상세형상을 만들고, 구체적인 형상은 모따기, 색채와 문양을 점차적으로 이용해서 아름다운 형상으로 다듬어 간다. 이 연구에서는 아름다운 교량설계와 관련한 기존의 연구결과(김남희와 고현무 2005, 2006, 2007, 2008)들을 토대로 창의적 교량형태 생성을 위하여 발견한 다음의 4가지 원리들을 제시하고자 한다.

- (1) 기본 구조시스템을 이용하여 다양한 전개방식으로 새로운 구조시스템을 구성한다.
- (2) 교량 주변의 문맥적 요소를 이용한다. 문맥적 요소에는 교량이 세워질 지형적 여건, 교량주변의 건축물 형태, 예술적 양식을 포함한다. 이러한 문맥적 요소는 교량의 전체 형태 또는 교량 상세 디자인에 적용한다.
- (3) 비례와 조화의 미학적 원리를 이용한다.
- (4) 자연형태의 의태적 모방으로 다양한 형상을 개발한다.

이상의 교량형태생성과 원리들을 이용해서 얻게되는 새로운 교량형태는 설계에서 요구되는 기본적 하중조건에 대해서 구조적으로 합리적인지 살펴봄으로써 구조적 안전성이 확보된 교량형태로 보완해야한다. 따라서 그림 1에서 제시하였듯이 교량형태 구조의 스케치단계 이후에 간단히 정력학적 개념을 이용해서 구조적 타당성을 살펴보는 과정이 필요한 것이다. 이에 대한 구체적인 해결방법은 제4장에서 설명하기로 한다.

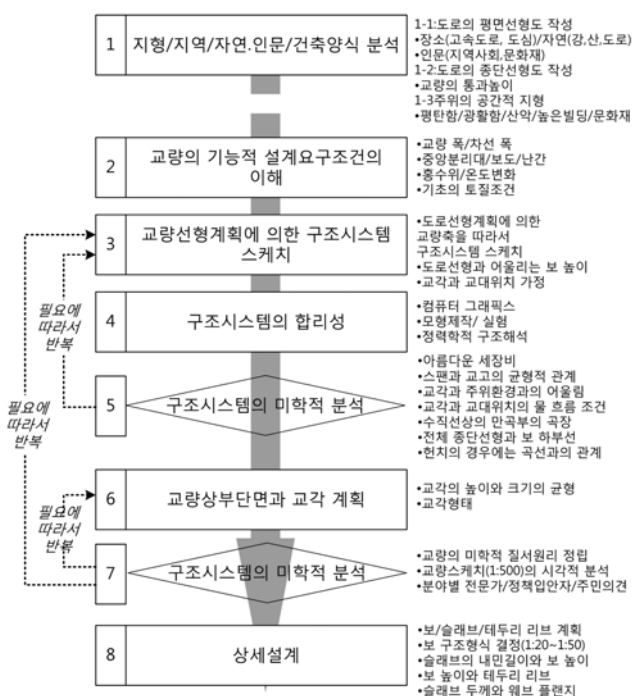


그림 1. 교량의 문맥적 설계법

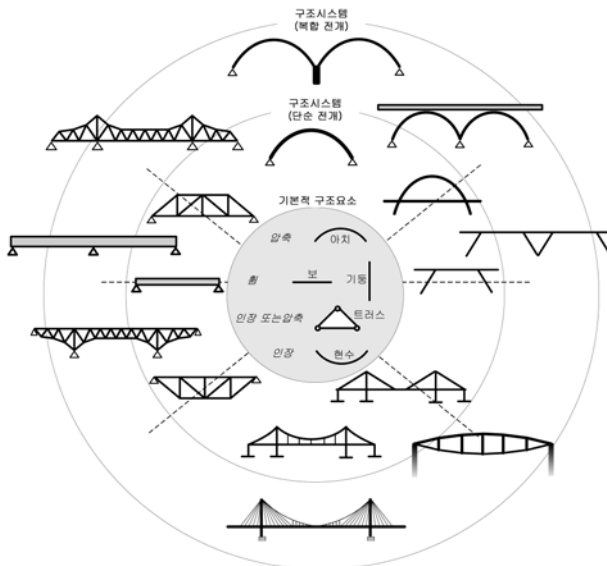


그림 2. 교량 구조시스템의 전개

3.1 기본 구조시스템의 결합

3.1.1 기본적 구조요소와 교량형태

일반적으로 개념적 교량설계에서는 정량적인 구조해석보다는 형태와 힘의 흐름의 역학적 관계의 합리성을 토대로 다양한 교량형태의 설계대안을 정성적으로 생성하는 것이 설계의 시작점이다. 이 원리에 의한 새로운 형태 생성이 가장 기본적인 방법이면서 또한 가장 쉽게 이용할 수 있다. 복합적인 시스템을 만들기에 앞서서 반드시 기본적인 구조시스템의 거동을 충분히 이해하는 것이 매우 중요하다. 그림 2는 지금까지 축적된 기본적 구조요소를 토대로 다양한 교량의 구조시스템으로 전개하기 쉽도록 구조형태에 대한 생성 질서를 정리하였다. 사실상 구조요소의 분류 기준은 형상 또는 부재의 응력상태, 또는 재료 등 다양할 수 있지만, 이 연구에서는 구조시스템의 개발에 초점을 두고 부재의 응력상태를 기준으로 구성하였다. 즉, 단순압축, 단순인장과, 압축과 인장을 한 단면에서 동시에 받는 휨응력과 삼각형을 구성해서 부재별로 분담하여 인장 또는 압축을 받는 트러스 요소를 기본적 구조요소로 선택하였다. 일반적으로 대부분의 교량형태는 이러한 기본적 구조요소의 다양한 결합으로 표현할 수 있다.

3.1.2 다양한 교량시스템

구조시스템의 기본적인 힘의 흐름의 원리에 입각하여 구조

물의 형상을 결정하는 것은 구조물의 간결미와 더불어 경제적 설계가 가능하다. 이러한 원리를 이용하여 개발된 구조시스템의 사례로 Robert Maillart가 개발한 3힌지 아치구조를 들 수 있다 (Billington 2003). 초기에 조적식 아치구조의 형태를 준용하여 개발한 철근콘크리트 아치구조에서는 짝 채운 스패드럴을 사용하였다. 그러나 이 스패드럴부분에 균열이 발생하자, 의미없는 구조재의 배치는 재료의 비합리적 거동을 야기시킴을 인지하고 짝 채운 스패드럴을 간결하게 정리하여 하중전달 기능만을 충실히 하도록 발전시켰다. 그림 3a는 3힌지 아치구조 형식을 이용한 스위스 Salginatobel 교 (<http://en.structurae.de/files/photos>)이다. 이러한 구조시스템의 간결미를 이용한 아름다운 교량은 Gustave Eiffel교량 설계 사례에서 찾아볼 수 있다. 그림 3b는 Gustave Eiffel이 1877년에 포르투갈 Maria Pia 교(<http://en.wikipedia.org/wiki>)에 사용한 2힌지 아치구조이다. 그림 3b에서와 같이 최대 휨모멘트가 발생하는 위치에서는 최대단면을, 최소 휨모멘트가 발생하는 위치에서는 최소단면으로 각각 설계함으로써 간결하고 아름다운 초생달같은 교량형태가 되었다. 따라서 구조적 형상에 어울리는 재료배치는 구조적 힘의 흐름에 적합한 재료선택을 의미하며, 이는 결과적으로 경제적이며 간결미를 주는 교량설계가 되는 것을 의미한다.

새로운 구조시스템은 그림 2에서와 같이 단순전개에서 구조물의 지지조건에 따라서 연속적으로 전개하거나, 기본구조시스템을 직렬적 또는 병렬적으로 나열하면 새로운 교량형태를 얻게 된다. 그림 4의 영국 Saltash 교(<http://www.flickr.com/photos>)는 아치와 현수의 상호작용을 이용해서 렌즈 모양의 새로운 구조시스템으로 개발된 Lenticular 트러스 구조를 보여준다. 그림 5는 정아치와 역아치의 형상을 단순히 직렬적으로 배열해서 새로운 형태로 구상한 미국 Irene Hixon Whitney 교 (<http://www.phototour.minneapolis.mn.us>)이다.

3.2 문맥적 요소와 교량형태

교량형태에 영향을 미치는 문맥적 요소는 지형, 지역, 사회, 인문, 건축양식 등 매우 다양하지만(김남희와 고현무 2006), 이 절에서는 지형적 요소와 건축양식적 요소에 대해서만 제한적으로 살펴본다.

3.2.1 지형적 요소

사실상 모든 교량은 각 교량이 세워지는 입지조건이 다르

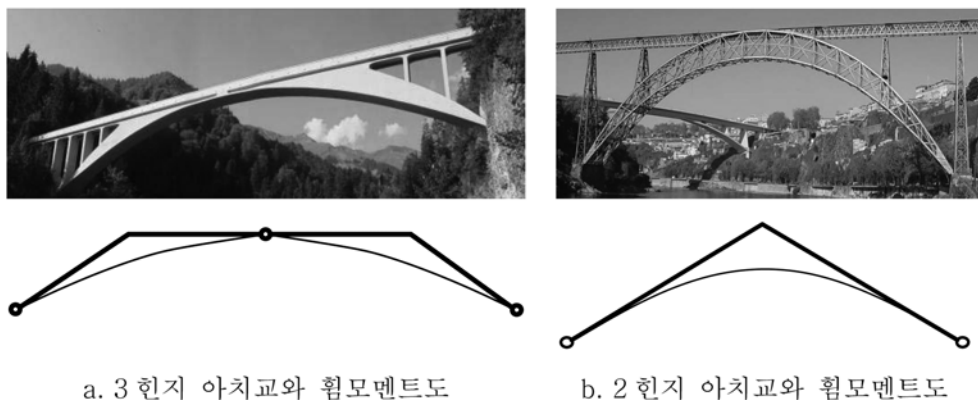


그림 3. 아치와 힌지의 결합 구조시스템



그림 4. Lenticular 구조시스템

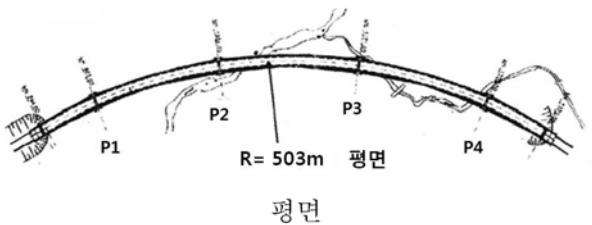


그림 5. 정아치와 역아치의 나열 구조시스템

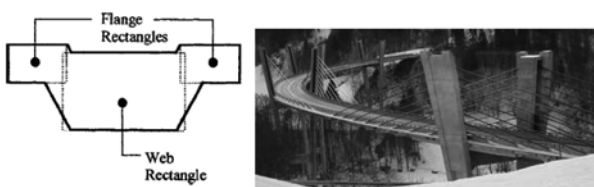
므로 태생적으로 독창적 교량형태미를 가지도록 되어있다. 이러한 독창적 설계요소는 장애로 생각하기보다는 적극적으로 교량형태 생성에 이용해야 된다. 교량의 위치와 전체적인 입면적 형상은 도로 선형계획의 일부로 주변 도로와의 연속성을 고려한 중단선형과 횡단선형으로부터 출발한다. 실제로 지금도 아름다운 교량으로 인정받는 많은 교량이 지형적 여건을 교량형태 모티프로 적극 이용한 경우이다. 그림 6은 산세는 아름답지만 험준한 알파인 계곡에 설계된 Sunniberg 교이다. 입지 조건이 깊은 계곡인데다 곡률이 503 m나 되



사진 [http://www.ce.ntu.edu.tw/photo/]



평면



주탑 형상

그림 6. 높은 교각과 낮은 주탑을 가진 Sunniberg 교

는 상황에서 새로운 교량의 모습으로 연출하고자 사장교를 선택했지만, 60 m이상의 교각 높이가 필요했다. 따라서 높은 교각에 높은 주탑을 사용할 수 없어서 낮은 주탑으로 결정하고, 주탑의 형상을 그림과 같이 2개의 사각형 플랜지와 중앙 사각형 웨브형상으로 보강하게 되었다(Honigmann and Billington, 2003). 이는 곡선형 사장교의 주탑에 부담되는 케이블 장력효과뿐만 아니라 종방향과 횡방향 휨응력을 저항하기 위한 것이다. 종방향 휨은 두개의 사각형 플랜지에 의해서, 횡방향 휨은 사각형 웨브에 의해서, 그리고 축방향 하중은 모든 단면 구성요소가 저항하도록 계획된 것이다. 또한, 곡선교에서 운전자의 가시성을 높이고자 사장교의 윗부분을 넓게 펼쳐줌으로써 기존의 진부한 사장교 형태가 아닌 그 지역에서만 가능한 새로운 엑스트라도즈교의 교량형태로 발전시켰다.

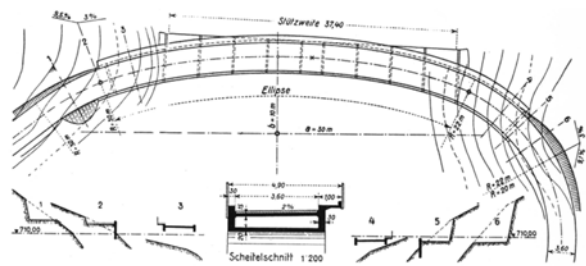
그림 7은 경제적인 재료 사용과 시각적 아름다움을 동시에 만족한 교량으로 유명한 Schwandbach교를 보여준다. Robert Maillart는 지형적 입지조건이 곡선인 점을 이용해서 곡선형 아치교로 설계하였다. 더욱이, 기존의 데크에서 스패드럴로, 그리고 아치로 순차적인 하중 전달방식을 효율적으로 발전시키기 위해서 데크와 아치가 일체화 거동을 하도록 데크보강시스템으로 설계하였다. 따라서 교량길이 37.4 m에 비해서 아치 두께는 200 mm로 얇아진 경제적 설계가 가능하였다(Billington 2003). 아치의 얇은 두께 덕분에 곡선형 입지조건에 아름다운 조형적 형상으로 구현된 사례이다.

3.2.2 건축양식을 반영한 교량형태

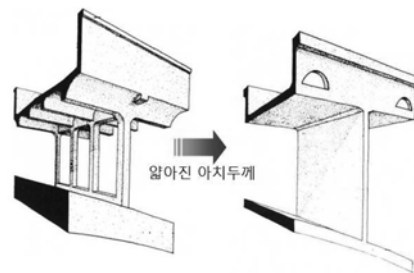
건축양식은 각 시대별로, 재료와 공업기술의 발전과 더불어



a. 사진



b. 평면



c. 아치 테크

그림 7. 곡선 지형에 어울리는 Schwandbach교



a. 로마네스크 양식



b. 르네상스 양식



c. 고딕양식



d. 아르누보 양식



e. 아르데코 양식

그림 8. 건축양식을 반영한 교량형태

어서 나라별로 변화해가고 있다. 일반적으로 근대이후의 교량설계사례에서 건축양식을 반영한 교량형태는 많지 않았다. 이 연구에서는 서양건축양식(Strickland 2007)의 특징을 기준으로 기존 교량형태들을 살펴보았다(김남희와 고현무 2008). 교량형태도 다양한 건축양식을 교량의 구조시스템, 규모와 주변건물의 형태 등을 고려해서 반영하면 아름다운 교량형태로 새롭게 변화를 줄 수 있음이 발견되었다. 그림 8은 건축양식을 반영한 교량형태들에 대해서 몇 가지 사례를 정리한 것이다. 그림 8a는 소련에 있는 Bolsheokhtinsky 교(<http://www.saint-petersburg.com/bridges/>)이다. 이 교량은 로마네스크 양식의 탑을 2경간 아치 트러스교의 중앙부에 설치하여 교량전체의 위엄을 고양시켰다. 그림 8b는 프랑스 폰네프 교(<http://www.flickr.com/photos/>)이다. 전체적으로 교량형상과 교각상세에 이르기까지 르네상스 양식을 반영하여 인간적인 비례감으로 친근감을 주는 교량이 되었다. 그림 8c는 미국 뉴욕 브룩클린교(<http://www.flickr.com/photos/>)이다. 현수교에서 케이블의 새그랑과 거더의 수직하중을 고려해서 설계해야되는 주탑설계에서 고딕양식의 이용은 구조적 기능뿐만 아니라 형태적 측면에서 매우 긍정적인 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림 8d는 미국 뉴욕 센트럴파크에 있는 보도교(<http://www.flickr.com/photos/>)이다. 곡 선적 장식이 많은 아르누보 양식을 이용해서 공원의 보도교를 설계함으로써 주변경관에 어울릴뿐만 아니라, 사람들에게 자연스럽게 다가가는 친근감을 주는 교량형태를 얻게된다. 그림 8e는 미국 오키오주 Dayton교(<http://www.burgessnipl.com/>)이다. 기존의 노후화된 교량을 미학적으로 개선한 사례로써, 주변 건축물의 아르데코 양식과 어울리도록 교각상세에 아르데코 양식을 반영한 교량형태이다.

3.3 미학적 원리와 교량형태

고대부터 여러 분야에 걸쳐서 사용되는 비례, 조화, 통일, 리듬과 같은 미학적 원리는 아름다운 교량형태 설계에서도 이용이 가능하다는 것이 다른 연구를 통해서 이미 밝혀졌다(김남희와 고현무 2005, 彩山和雄 2004). 특히, 아름다운 비

례와 관련해서는 자연현상을 수학적으로 표현한 황금비례와 고대 로마 건축가인 비트르비우스의 인체비례를

많이 사용한다. 교량설계에서는 구조적 강도와 강성 측면에서 요구되는 비례를 필수적으로 만족하는 범위내에서 다양한 기하학적 형상을 만들어가는데 미학적 비례원리를 적용할 수 있다.

그림 9a는 3경간 연속 변단면 거더교를 황금비례를 이용해서 현치형상을 스케치해 본 사례이다. 만일 두 교각의 위치가 지형이나 지반조건 때문에 거의 확정된 경우라면, 두 교각위치 사이의 거리를 기준 '1'로 정해서 미학적 비례원리로 나머지 구성요소를 계획할 수 있다. 이 그림에서는 두 교각 사이의 거리를 '1'로 정하고, 교각 외측의 내민보 부분은 가로와 세로가 '0.618' 인 정사각형이 되도록 구성하여 시각적 요소가 되는 파라렛 부분까지 모두 황금비례 범위에

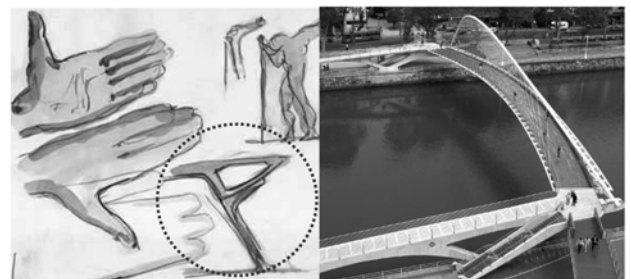
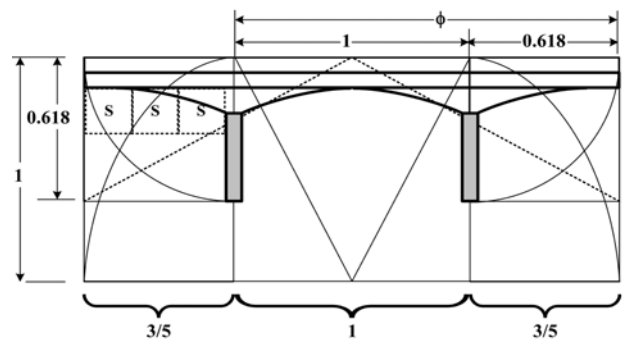


그림 9. 황금비례와 인체비례에 근거한 교량형상

서 아우를 수 있도록 표현한 것이다.

아름다운 곡물이나 기하학적 형태를 표현하고 싶다면 황금 비례와 같은 수치적 비례를 이용할 수도 있지만, 보다 더 자연스러우면서도 구조적으로 그리고 심리적으로 안정감을 느끼게 하는 형상비율을 찾기는 매우 어려운 일이다. 최근 건축가 Santiago Calatrva(Tzonis and Lefavre, 2001)는 교량과 건축물의 새로운 구조적 형태를 만들기 위해서 인체 또는 동물의 형상이나 움직임의 살피고 구조물 형태구상에 많이 이용하고 있다. 그림 9b는 기울어진 포물선형 강제 아치교에 조형적 요소로 만들어진 램프를 자연스럽게 연결하여 보행자 동선을 자연스럽게 유도하고 있다. 램프의 지지부 교각 형상은 인체의 벌어지는 각도에서 만들어지는 형상을 이용한 설계사례이다.

3.4 자연형태 모방 교량형태

살아있는 유기체나 자연에서 구조적 원리와 형태를 이용한 구조물 형태생성은 매우 자유로우며 합리적인 힘의 흐름의 질서를 고려하는 교량형태 설계에 적용가능하다(Tzonis, 1999). 그림 10a의 물고기 형상을 규모가 큰 케이블 아치교에 구현함으로써 기존의 아치교와는 색다른 신선한 느낌을 준다. 그림 10b는 교량 횡방향으로 길다랗게 내민 캔틸레버의 데크를 받는 교각형상을 건장한 황소의 뿔 모습을 유추해서 형상화함으로써 매우 안정된 느낌을 준다.

4. 정력학적 해석법을 이용한 새로운 교량형태 생성

앞서서 살펴본듯듯이 새로운 교량형태 생성의 출발점은 구조적 관점에서부터 비구조적 예술적 양식에 이르기까지 다양하다. 따라서, 개념적 교량형태가 완성되면 그림 1의 제4단계 과정인 구조시스템의 합리성을 살펴봐야 된다. 이를 위해서 구조해석, 모형제작, 컴퓨터 그래픽스 시뮬레이션, 모형 실험 등을 수행해서 구조 및 시공적으로 실현가능한지 여부를 따져본다. 이 연구에서는 개념적 설계단계에서 교량형태의 안전성을 살펴봄과 동시에 설계대안을 생성하는 구조해석적 방법으로 정력학적 도해법(graphic statics)을 이용하기로 한다. 이해를 돕기위해서, 먼저, 정력학적 도해법의 기본개념을 살펴본 후, 교량형태의 생성과정에서 도해법을 이용하는 방법을 설명한다. 다양한 설계대안의 생성, 힘의 흐름에 순응하는 교량형태 결정, 형태-역학-재료의 관계를 시각적으로 분석하는 도구 등 여러 가지 방법으로 사용이 가능하다.

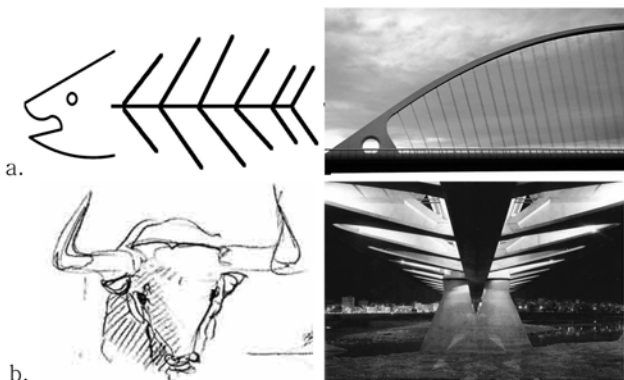


그림 10. 자연형태 모방의 교량형태

4.1 정력학적 도해법

정력학적 도해법은 거슬러 올라가면 Leonardo da Vinci (1452-1519)와 Galileo Galilei(1564-1642)가 사용한 힘의 합성의 원리와 동일한 개념에 입각하고 있다. Pierre Varignon(1654-1722)는 힘의 다각형법을 이용해서 장력 구조물의 구조해석에, Giovanni Poleni(1683-1761)는 조적조 돔 구조해석에, James Clerk Maxwell(1831-1879)은 트러스 구조해석에 사용했었다. 그후 Robert H. Bow가 현재 사용하고 있는 도해법의 부호체계(Smoley 1906)를 개발한 후 1820년대부터 프랑스와 독일에서 널리 사용하게 된 것이다. 도해법을 이용해서 구조물에 작용하는 힘의 다각형을 그리기 위해서는 기본적 약속 사항은 다음과 같다. (1) 시스템 내부장과 외부장을 구분하고, (2) 구조시스템의 모든 부재에 대해서 힘의 벡터를 정의할 수 있도록 외부장에 작용하는 힘과 힘 사이에는 알파벳 대문자를, 내부장이 부재로 구획된 공간마다 알파벳 대문자를 사용해서 부호를 정하고, (3) 하나의 구조시스템에 대해서는 형상과 작용하는 하중에 대해서는 일관성 있는 스케일을 적용한다. 도해법에서 각 부재의 부재력 크기는 힘의 다각형의 기하학적 길이를 재서 구하기 때문에 일관된 스케일을 사용하는 것이 매우 중요하다.

그림 11은 도해법을 이용해서 힘의 다각형을 그리는 과정을 보여주고 있다. 작도순서는 크게 두 단계로 나누어서 도식화 한다. 첫 번째 단계에서는, 맨처음 바깥 외력장을 하나의 일관된 방향(예, 시계방향)으로 표현한다. 이 과정에서 주어진 하중과 반력에 대한 힘의 평형이 파악된다. 두 번째 단계에서는, 각 부재와 상응하는 부재력을 표현한다. 이때 두개 이상의 미지 부재력이 발생하지 않는 절점을 택하고, 외력장을 도식화할 때와 마찬가지로 동일한 방향으로 순차적으로 부재력을 도식화한다. 또한 각 부재의 경사는 힘의 다각형에 그 대로 반영되도록 나란하게 작도한다. 그림 11a의 트러스에 대한 힘의 다각형을 구해보면 그림 11b와 같다. 처음 시작하는 외력 위치는 자유롭게 정할 수 있지만, 만일 외력장 AB사이의 반력부터 시작한다면, 그 다음은 처음 기준으로 정한 방향에 맞춰서 다음에서 설명하는 순서와 같이 절점을 순차적으

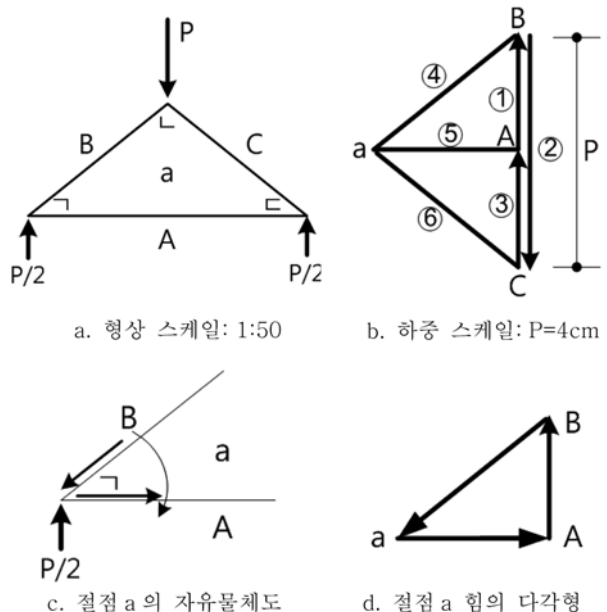
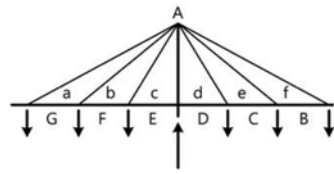
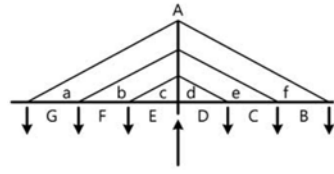


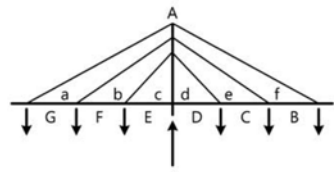
그림 11. 도해법을 이용한 힘의 다각형



a. 부채꼴



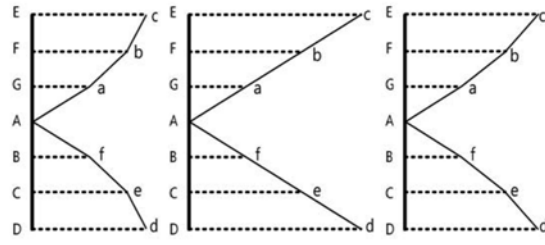
b. 하프



c. 수정된 하프



g. 프랑스 Millau Viaduct 사진



d. 부채꼴

e. 하프

f. 수정된 하프

외력 거더 케이블

그림 12. 다양한 설계대안 교량형태와 힘의 다각형 (동일한 형상 및 하중 스케일)

로 이동해 가면서 힘의 다각형을 구한다.

- ① 외력장 AB사이의 반력 P/2
- ② 외력장 BC사이에 작용하는 절점 하중 P
- ③ 외력장 CA에 작용하는 반력 P/2
- ④ 절점 'g'을 중심으로 부재 Ba와 나란한 힘
- ⑤ 절점 'g'을 중심으로 부재 aA와 나란한 힘
- ⑥ 절점 'c'을 중심으로 부재 Ca와 나란한 힘

힘의 다각형을 모두 완성한 후에는 각 절점에서 힘의 평형 상태와 축응력의 부호(즉, 인장 또는 압축)를 결정한다. 예를 들어서, 절점 'g'에 모이는 외력과 부재력만을 도식화해보면 그림 11d와 같은 폐다각형으로 힘의 평형을 이루고 있음을 알 수 있다. 이때 부재력을 도식화하던 순서대로 힘의 다각형을 읽을 때, 절점을 누르는 방향이면 압축재이고, 반면에 절점을 잡아당기는 방향이면 인장재이다. 따라서 부재 Ba는 압축재, 부재 aA는 인장재이다.

정력학적 도해법의 가장 큰 장점은 구조물 형상과 구조적 거동과의 관계를 시각적으로 이해할 수 있다는데 있다. 사실상 컴퓨터의 수치해석에 의존하는 구조해석이 활발하게 이루어지기 이전에도 다양한 형태의 구조물이 설계되었으며, 이러한 구조물의 구조해석에 정력학적 도해법이 광범위하게 사용되었다(Allen and Zalewski, 1998).

4.2 정력학적 도해법을 이용한 교량형태 생성

이 절에서는 정력학적 도해법이 구조적 거동을 파악하는 해석적 도구뿐만 아니라 새로운 교량형태 설계과정에서 여러 가지 도구로도 사용될 수 있음을 설명한다. 생성된 교량형태의 이해를 돕기 위해서 실제 교량사례들을 그림에 포함하였다. 이는 기존의 실제 교량들이 정력학적 도해법을 이용해서 개념적 설계를 수행하였는지에 대해서는 조사하지 않았지만, 향후, 유사한 교량형태 설계에 정력학적 도해법을 사

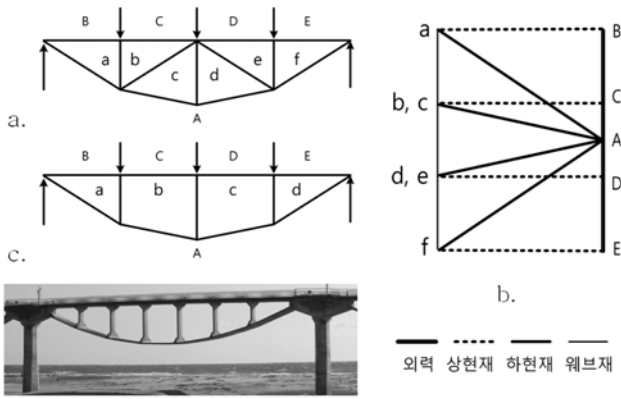
용할 수 있음을 보여주려고 한 것이다.

4.2.1 다양한 설계대안의 생성 및 비교

개념적 설계단계에서는 이름답고 효율적인 교량형태를 결정하기 위해서 우선적으로 주요한 변수만을 변화시켜가면서 설계대안을 생성하고 비교평가하는 것이 매우 중요하다. 그림 12에서는 사장교 설계의 경우, 케이블 배치와 구조물의 부재력 관계를 고려해서 설계대안을 생성하고, 그 결과를 비교하는 과정을 설명한다. 이 예제에서는 중력방향 하중만을 고려해서 대안을 살펴보았다. 여러 가지 설계대안을 비교선택해야 하므로, 동일한 외력에 대해서 하나의 스케일로 통일하여 힘의 다각형을 작도하였다. 그림 12a의 부채꼴 케이블 배치에 대해서는 그림 12d에, 그림 12b의 하프형 케이블 배치에 대해서는 그림 12e에, 그림 12c의 수정된 하프형 케이블 배치에 대해서는 그림 12d에, 각각 상응하는 힘의 다각형이 주어졌다. 결과적으로 각 설계대안의 구조형상이 부재력에 미치는 효과를 힘의 다각형의 상대적 길이의 비를 기능해 보면서 설계대안의 평가를 용이하게 수행할 수 있다. 이러한 방법은 그림 12g의 Millau Viaduct(<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/fr>)와 유사한 사장교 설계를 수행하는데 도움이 될 것이다.

4.2.2 형태-역학 관계를 이용한 교량형태 생성

정력학적 도해법은 구조적 힘의 흐름의 변화를 곧바로 교량형태의 생성에 반영하여 새로운 형태를 만드는데 매우 유용하다. 예를 들어서, 그림 13a의 트러스를 구상하고, 이에 대해서 힘의 다각형을 작도해보면 그림 13b(일본 Shiosai 교)와 같다. 여기서 예제 트러스의 힘의 다각형에서 살펴볼 수 있듯이, 경사부재 bc와 de는 'b'와 'c', 그리고 'd'와 'e'가 동일한 위치에 있어서, 부재의 길이가 '영'이며, 이는 부



d. 일본 Shiosai 교

그림 13. 형태-역학 관계를 이용한 교량형태

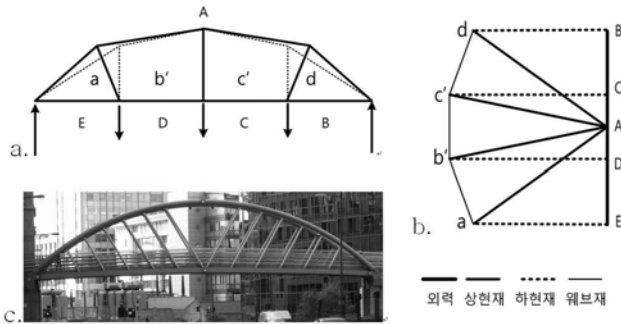


그림 14. 형태-역학-재료 관계를 이용한 교량형태

재력이 ‘영’임을 한눈에 보여주는 것이다. 부재력이 영인 부재들을 제거하고 간략히 그림 13c와 같이 표현할 수 있다. 이러한 원리를 이용해서 실제 교량을 설계하면 그림 13d와 유사한 교량형태를 생성할 수 있다.

4.2.3 형태-역학-재료 관계를 이용한 교량형태 생성

그림 14는 정력학적 도해법을 이용해서 상현재의 단면적이 동일한 타이드 이치교의 형태를 생성해보고자 한다. 수직재가 반듯한 타이드 이치의 경우 힘의 다각형은 그림 14b와 유사한 모양으로 작도된다. 여기서, 상현재 모두 동일한 압축력을 받도록 하기 위해서, 그림 14b와 같이 Aa, Ab', Ac'과 Ad의 길이를 동일하게 작도한다. 그림 14b의 힘의 다각형과 상응하도록 트러스 구조의 부재들을 움직여서 그림 14a의 실선과 같은 형태를 얻는다. 이와 같이 힘의 크기를 조절하여 필요한 단면적과 형상을 설계하면, 그림 14c (<http://www.brantacan.co.uk>)와 유사한 교량형태를 얻을 수 있다.

5. 결론

아름다운 교량형태의 설계는 개념적 설계단계에서의 대안 생성에 따라서 그 결과가 크게 달라진다. 이 논문에서는 창의력은 무에서 유를 창조하는 것이 아니라 기존 개념들의 재구성을 의미하는 것으로 새롭게 재정의하였다. 이러한 창의력은 역학적 힘과 형태와의 관계를 토대로 이루어지는 구조시스템의 생성질서를 확장시키는 것뿐만 아니라, 건축양식과 같은 예술적 요소를 교량설계와 접목하는 것을 포함한 개념이다. 이 연구에서 재정의한 창의력을 바탕으로 4가지 주요한 교량형태 생성의 원리를 정리하였다.

1. 기본 구조시스템을 이용한 전개방식으로 새로운 구조시스템을 구성한다.
2. 교량 주변의 문맥적 요소를 이용한다.
3. 비례와 조화의 미학적 원리를 이용한다.
4. 자연형태의 의태적 모방으로 다양한 형상을 개발한다.

다양한 방법으로 생성된 교량형태는 아직 구조적 합리성이 확보되지 않은 상태이므로, 상세설계를 수행하기 이전에 구조적 타당성을 살펴봐야 된다. 이를 위해서, 교량형태와 힘의 흐름의 상호연관관계를 시각적으로 보여주는 정력학적 도해법을 개념적 설계단계에서 교량형태 생성과정에 적용해 봄으로써, 그 효용성을 살펴보았다. 정력학적 도해법은 기존의 구조해석 도구라는 개념에서 훨씬 확장된 수단임을 알 수 있었다. 실제로 정력학적 도해법이 다양한 설계대안의 생성, 힘의 흐름에 순응하는 교량형태 결정, 형태-역학-재료의 관계를 시각적으로 분석하는 도구 등 여러 가지 방법으로 사용 가능함을 보여주었다. 이 연구에서 제시하는 교량형태 생성 방법은 실무자들에게뿐만 아니라 미학적 교량설계 교육에 대한 새로운 교육모델로도 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 국토해양과학기술부 건설핵심기술연구개발 사업비에 하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사 드립니다.

참고문헌

김남희, 고현무(2005) 고대 교량에 나타난 미학적 개념: 교량 미학의 뿌리를 찾아서, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제 25권, 제6A호, pp. 1061-1069.

김남희, 고현무(2005) 교량설계와 황금률, **대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회.

김남희, 고현무(2006) 미학적 교량설계를 위한 문맥적 접근법, **대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회.

김남희, 고현무(2007) 교량의 색채설계에 대한 연구, **대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회.

김남희, 고현무(2007) 아름다운 교량형태를 위한 미학적 설계법, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제4A호, pp. 535-546.

김남희, 고현무(2008) 아름다운 교량설계: 교량조형 설계원리, KBRC TRS 009, 교량설계핵심기술연구단, 서울대학교.

Allen, E. and Zalewski, W. (1998) *Shaping Structures: Statics*, Wiley, John & Sons, Incorporated.

Billington, D.P. (2003) *The art of structural design a swiss legacy*, 1st ed. Vol. 1. Princeton New Jersey: Princeton University Art Museum.

Honigmann, C. and Billington, D.P. (2003) Conceptual design for the sunniberg bridge, *ASCE Journal of Bridge Engineering*, Vol. 8, No. 3, May 1.

Dym, C.L., Agogino, A.M., Eris, O., Frey, D.D., and Leifer, L.J. (2005) Engineering design thinking teaching and learning, *Journal of Engineering Education*.

Frederick Gottemoeller. *Bridgescape: The Art of Designing Bridges* John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

Schlaich, Mike (2006) Challenges in education-conceptual and structural design, *Proceedings of IABSE 2006 Annual Meetings and Symposium*, Budapest, Hungary.

Smoley, C.K. (1906) *Graphic Statics and Bridge Trusses*, International Textbook Company, Scranton, PA.

Strickland, Carol (2007) *Annotated Arch: A Crash Course in the History of Architecture*, Andrews Mcmeel Pub.
Tzonis, A. (1999) *Santiago Calatrava: The Poetics of Movement*, Universe.
Tzonis, A. and Lefavre, L. (2001) *Santiago Calatrava's Creative*

Process: Sketchbook, Birkhauser.
彩山和雄 (2004) “橋의 造型學”, 朝倉書店.

(접수일: 2009.1.20/심사일: 2009.2.20/심사완료일: 2009.4.20)