

비정형구조의 3차원 좌표제어를 위한 CNC Twisted Tube 공법 적용 -대구 대표물문화관(The ARC)를 중심으로-

CNC Twisted Tube Method for 3D Coordinate Control Technology for Freeform Structure -Focused on The ARC in DaeGu-

류 한 국^{1*} 김 성 진²

Ryu, Han-Guk^{1*} Kim, Sung-Jin²

Department of Architectural Engineering, Changwon National University, Changwon, GyeongNam-Do, 641-773, Korea ¹

Withworks, Seokchon-Dong 15-1 Songpa-Gu, Seoul, 138-842, Korea ²

Abstract

Generally, the envelope of a freeform building is composed of a structure made with rectangular or C-shaped steel pipe, and steel or aluminum panel finishes on the structure. However, these construction methods increase material loss and cost and time. There are also numerous cases of misunderstanding of design and difficulties in construction, which frequently cause construction errors. Such construction errors decrease construction productivity, resulting in poor construction quality and the need for rework, as well as cost and time overruns. To solve the problem, this study proposes a 3D coordinate control technology for freeform structure implemented through a CNC(Computerized Numerical Control) Twisted tube method, and by extension, develops a BIM-based envelope construction method for freeform building.

Keywords : digital manufacture, freeform architecture, 3D, coordinate control, computerized numerical control

1. 서 론

1.1 연구의 배경

최근 건축은 정형의 건축물의 외관과 설계 범위를 벗어난 비정형의 설계, 시각화, 3차원 모델 구현이 이루어지고 있다[1]. 일반 정형건축물과는 달리 비정형건축물의 지붕과 외벽은 비정형 디자인의 외벽시스템과 배수, 방수의 성능을 지닌 지붕마감시스템으로 설계되고 시공되었다[2]. 그러나 비정형 건축물은 외벽과 지붕의 구분이 없어지고 외피로의 개념으로 통합된다.

기존 비정형 건축구조물은 시공과정에서 각 주요부의 높이를 검측하며 시공하게 되는데, 이렇게 현장에서 검측과 시공이 동시에 이루어질 경우, 검측 오류가 발생하고 시공 오류가 발생하면 철거 후 재시공하는 사례가 다수 존재한다. 일반적으로 비정형 건축구조물의 곡면 외피를 시공하기 위한 구조체는 스틸 각파이프나 C형강으로 비정형 형태를 만들고 거기에 외장 시스템을 연결하여 외피를 구성한다. 이러한 공법은 공사 기간 지연과 추가 공사비가 발생한다.

최근 10년간 이러한 문제점을 해결하기 위하여 비정형 건축물의 구현을 위한 연구가 진행되었다. 비정형 건축의 형태적인 측면에서의 특성과 BIM적용 가능성 제안하고[3] 기존의 비정형 건축물의 사례를 조사하여 건축가의 설계프로세스, 엔지니어링, 제작 문제를 고찰하고[4], 패속조형(rapid manufacturing)이 건축 부재의 설계와 제작에 미치는 과정을 분석하고[5], CAM(Computer Aided

Received : January 2, 2013

Revision received : March 6, 2013

Accepted : April 10, 2013

* Corresponding author : Ryu, Han-Guk

[Tel: 82-55-213-3804, E-mail: hgryu@changwon.ac.kr]

©2013 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

Manufacturing)과 CNC(Computerized Numerical Control)를 통하여 디지털 정보로 부재를 생산하는 방법 [6]에 대하여 연구하였다. 그러나 이러한 방법은 패널 속성을 갖는 형태 생성 프로세스를 구현하는 데는 도움이 되지 않으나 매우 복잡한 기하학적 형태를 설계하고 부재를 생산하고 설치 및 시공하는 것은 매우 어렵다[7]. 즉, 여전히 비정형 건축물 시공은 설계오류와 시공자의 도면이해 부족, 시공경험 및 공법의 부재 등으로 인하여 시공 품질과 공기, 공사비 증가 등의 잠재적 리스크를 포함하고 있다.

이에 3D Digital 설계와 제작에 의한 구조체의 3차원 좌표제어 시스템과 CNC 가공에 의한 부재의 제작, 설치, 시공의 오차관리를 최적 시공이 필요하다. 따라서 본 연구는 제시하는 외피시스템은 이러한 기존 문제점을 개선하는 공법으로써 구조에서 부터 비정형 외피를 위한 좌표제어 기준을 설정하는 것으로 구조 개념이면서 외피의 하부 구조(sub structure)의 특징을 동시에 가지고 있는 셸 구조 시스템이다.

1.2 연구의 범위 및 목적

본 연구는 비정형 건축물 중 4대강 대표 물문화관(The ARC)을 중심으로 3차원 좌표제어 기술의 하나인 CNC Twisted Tube 공법¹⁾을 적용한 구조체의 시공과정을 면밀히 검토하여 3차원 좌표제어 기술로 비정형 건축물의 구현 방안을 제시한다.

2008년에 완공된 The Beijing National Stadium의 Curved Box structure 분석을 통하여 향상된 철골 구조체의 비정형 형상을 구현할 수 있는 방안을 모색하고 비정형 건축구조물의 곡면 외장재 시공을 위한 철골 구조체와 이를 이용한 비정형 건축구조물 시공방법을 제시한다.

비정형 외피 시스템을 일체형과 분리형으로 구분하면 일체형은 비정형 구조체에서 일정한 이격공간을 두고 외피가 설치되는 시스템으로 정의할 수 있으며 분리형은 구조체의 형상과는 무관하게 단순히 외피의 비정형 형상을 나타내기 위하여 외피 시스템을 구축하는 것이라고 정의할 수 있다. 비정형 건축물의 고급 기술일수록 일체형의 형태를 나타낸다.

비정형 건축구조물의 철골 구조체(Twisted Tube Structure)를 3차원 수치제어 기법을 이용하여 제작함으로써

1) 본 연구에서 제안한 CNC Twisted Tube는 CNC로 제작된 부재들을 좌표제어용 결속물로 결합시킨 비정형 철골 구조부재이다.

써, 비정형 건축구조물의 정밀한 시공을 가능하도록 한 지점제어 시스템이 적용된 하부철골을 이용한 비정형 건축구조물의 곡면 외장재 시공을 위한 철골 구조체 및 이를 이용한 비정형 건축구조물 시공방법을 제시한다. 즉, 본 연구는 비정형 건축물의 시공품질 향상과 공기단축 및 시공비 절감이 가능한 CNCTwisted Tube 공법을 제안하는 것을 목적으로 한다. 일체형 외피 시스템으로 제안한 CNC Twisted Tube 공법을 4대강 대표 물문화관(The ARC)²⁾에 적용한 결과, 비정형 건축물의 외피를 구성(비정형 구조체와 외피 시스템)하기가 용이할 것으로 판단된다.

2. CNC Twisted Tube의 디지털 최적화와 디지털 Mock-Up

2.1 The Beijing National Stadium의 Curved Box structure 분석

The Beijing National Stadium의 처마에 표현된 비정형 설계와 시공을 위해서 구부림 박스(curved box) 구조를 적용하였다[8]. 동지 모양의 구부림 박스 구조는 구조가 외피역할을 하는 데 이는 통제면 또는 참조면(control surface or reference surface)³⁾을 이용하여 정의하였다.(Figure 1과 2 참고)



Figure 1. Curved elements at the eaves of The Beijing National Stadium

- 2) 대표 물문화관(The ARC)은 지하1층, 지상3층의 문화 및 집회 시설로 연면적 5,966.42m², 높이 19.8m이다. 철골구조로 ETFE와 알루미늄 패널마감이다.
- 3) 비정형 건축물의 구조체와 외피시스템 구현시에 기준이 되는 면이다. 이 면을 기준으로 부재들의 위치를 결정하는 데 일정한 간격을 유지하면서 부재들을 이격시킬 수 있다. 2차원 설계에서 중심선이나 축결과 같은 시공의 기준이 되는 역할을 한다.

커브형 박스의 외부 플렌지는 구조 기둥이 비틀어지더라도 통제면과 평행하게 유지할 수 있도록 하였다. 구부림 박스 철골 구조의 단면은 참조면(reference surface)과 중앙선(center line of beam)이 교차하도록 하여 이를 기준으로 부재를 생산하였다.(Figure 2. 참고)

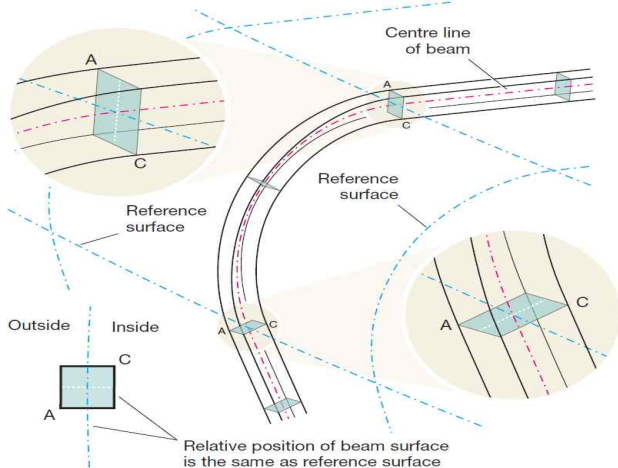


Figure 2. Detail of curved element at the eaves of The Beijing National Stadium

2.2 CNC Twisted Tube의 3D 디지털 데이터 생성

The ARC의 초기 철골 구조 설계는 원형 파이프를 2방향으로 bending한 후 용접하여 형상을 구현하는 방법이었다. 그러나 현재 국내 기술로는 2방향 철골 구조 부재의 원형 파이프를 bending하고 현장에서 용접 접합하는 것은 부재 생산과 가공의 정밀도 확보와 품질 보증에 문제점이 있고 짧은 공사기간 내에 제작하고 설치하기에는 어려운 공법이다.

왜냐하면 2방향 bending 원형 파이프를 생산하고 가공하기 위해서는 통합적인 3차원 디지털 좌표를 실시 설계 시에 도출하고 시공 단계에서는 이를 적용하고 관리·통제할 수 있어야 하기 때문이다. 따라서 비정형 패널 설치의 바탕이 되는 철골 구조의 2방향 bending 원형 파이프를 생산하고 공사 기간 내에 이를 정밀하게 정확한 위치에 설치 및 시공하기 위하여 3차원 좌표 수치제어가 중요하다. 이에 The ARC에 CNC Twisted Tube 공법을 적용하였다.

3. CNC Twisted Tube의 디지털 모델

3.1 CNC Twisted Tube의 디지털 모델

CNC Twisted Tube는 Figure 3과 같이 CNC로 제작된

부재들을 좌표제어용 스티프너와 Tenon joint로 용접 결합시킨 철골 구조부재이다. 비정형 외피 철골구조를 CNC Twisted Tube로 연결킴으로 비정형 건축물의 구조체를 완성한다.

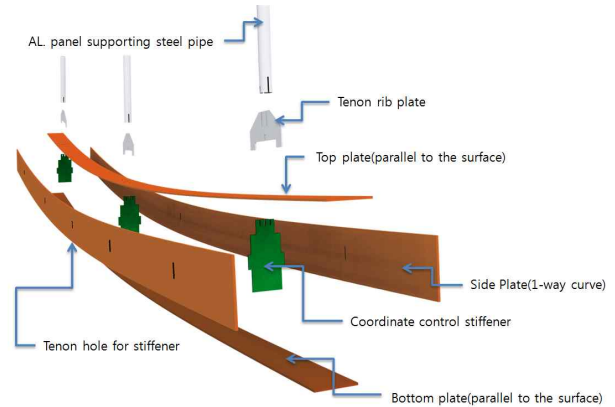


Figure 3. Component assembly of CNC Twisted Tube

3.2 CNC 제작-가공용 3D Model

대구 대표문화회관의 철골공사를 위한 시공자 선정 후 CNC Twisted Tube공법을 적용한 구조체를 제작한다. 이를 위하여 CNC제작-가공용 3D Model을 구축한다. 이는 CATIA 프로그램으로 설계되며 설계된 결과는 Figure 4, 5와 같다.

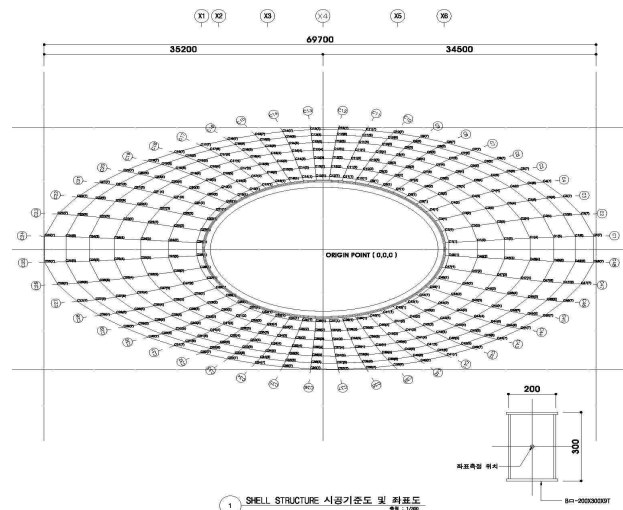


Figure 4. Basic construction drawing of steel structure

제작-가공용 3D Model은 디지털 최적화 단계에서 구축된 3D Model의 좌표를 기반으로 정밀 모델링되며, Figure 6과 같이 두 3D Model을 Cross check하여 오차를 수정한

다. 여기서 디지털 최적화의 의미는 비정형 건축물의 설계 프로세스가 기존 설계 프로세스와 다르게 적용됨에 따라 기인한다. 기존의 정형 건축물의 설계 프로세스는 많은 경험의 축적으로 최적화 되어 있다고 판단되나 비정형 건축물의 설계 프로세스는 거의 정형화 되어 있지 못하고 설계자들이 비정형 건축물 프로젝트를 수행한 경험이 많지 않기 때문에 최적화가 되지 않다고 할 수 있다. 따라서 비정형 건축물의 설계에서 주먹구구식의 설계 프로세스가 아니라 프로세스상의 로스가 없도록 하는 프로세스를 최적화 프로세스라고 정의할 수 있다.

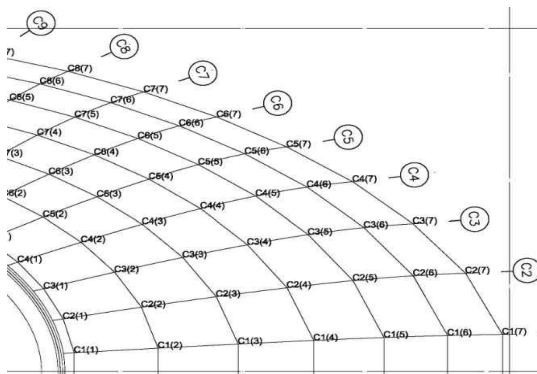


Figure 5. 3D coordinates data for CNC manufacturing

현재 비정형 건축물의 설계 프로세스는 단계별로 비정형 설계와 시공을 구현하기 위한 도구들도 다양하다. 이에 대한 내용과 프로세스 최적화에 대한 내용은 본 연구의 범위에서 벗어나며 향후 연구로 진행할 계획이다. 최적화 구현을 위하여 Figure 4, 5, 6은 CATIA 프로그램을 통하여 수치정보를 도출한 것이다. 이 수치정보는 부재 모델링, 가상 시공모델과 실물모형 구축으로 시공성 검토, 프로세스상의

손실 최소화를 가능하게 한다. Figure 7은 시공 후 상세 사진이며 오차가 없음을 알 수 있다.

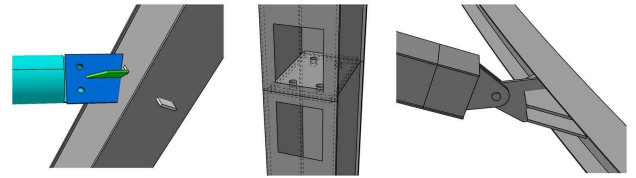


Figure 6. Cross check of the connection part of detailed digital mock-up



Figure 7. Connection details of the steel beam structure

4. CNC Twisted Tube 제작 및 설치

4.1 현장 시공을 위한 Mock-up

Figure 8과 같이 구조 실험으로 구조체의 구조 성능을 확인하고 구조 취약부분은 접합부 상세도를 보완하여 구조체의 제작에 반영한다.



Figure 8. Structure test for identifying the structural safety

Figure 9와 같이 마감(ETFE)의 Mock-up과 연계하여 공정간 간섭요소를 사전에 파악하고 공정간 접합상세를 보완하여 제작용 3D Model을 완성한다. 시공자는 본 구조체의 제작 전 현장에서 Mock-up을 통하여 제작 방법을 숙지하고, 부재를 확인한다.



Figure 9. Field mock-up of structure and finishes(ETFE)

4.2 구조체의 본 제작

구조체의 본은 CNC기법을 통하여 제작한다. 제작용 3D model을 통하여 강판과 강봉을 각각 구분하고 CNC Laser Cutting에 필요한 NC File을 생성한다. 수치화된 NC File 만으로 CNC 가공이 가능하나 공사 여건상 제작도 작성 과 도면검토 등의 2D작업이 필요하다.

NC file은 Figure 10과 같이 CAD File 형태로 전환하여 작업을 진행한다. 이는 철골 부재 생산시 발생하는 손실양을 최소화할 수 있다. CNC Laser cutting에 의해 제작된 각각의 소 부재들은 Figure 11과 같이 공장에서 가조립 과정을 거쳐 본조립 용접을 통하여 구조체의 일부분으로 완성 된다.

비정형 건축물의 시공에 있어서 공장에서 진행되는 조립 작업은 현장작업에 비하여 일정하고 안정된 환경으로 구조체의 정밀조립에 적합하며 정밀한 용접이 가능하여 매우 중요한 제작 단계이다.

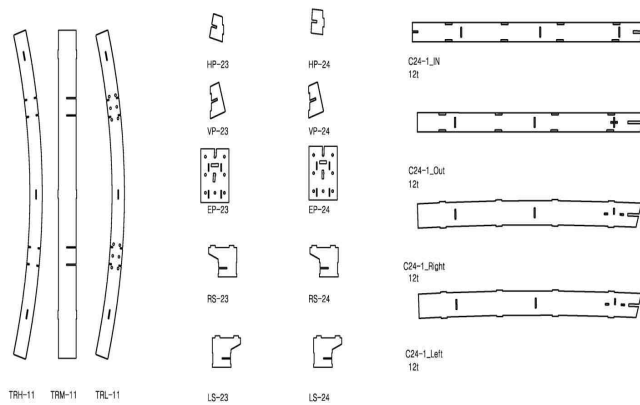


Figure 10. Development design for CNC manufacturing

제작 후 완성된 구조체들은 공장에서 비파괴검사를 통하여 안정성에 대한 1차 확인을 거쳐 현장으로 반입된다.



Figure 11. Components fabricating process for steel beam structure

4.3 현장 기준점 제어와 검측

공장에서 제작된 구조부재는 Figure 12와 13과 같이 도장과정을 거쳐 현장에 반입하여 검수 후 바로 현장조립을 실시한다. Figure 12는 기준점 제어를 위한 Template plate를 시공한 모습이다.



Figure 12. Template plate construction for basic point control



Figure 13. Field load of the steel beam structure

구조 부재들은 3D Digital 설계와 제작 단계에서 가조립 용 볼트를 적용하고 Digital mock-up 단계를 거쳐 Figure 14와 같이 조립방법에 대한 수차례 검증을 통하여 현장조립은 시행착오 없이 진행한다.



Figure 14. Field assembly and 3D coordinates check

구조부재 가조립 후 가설 벤트를 설치하여 조립시 부재 처짐에 대비하고 검측과 용접을 실시하였다. 광파기에 의한 검측 좌표 data는 3D model의 통합 3차원 좌표와 변환작업 없이 현장에서 비교가 가능하여, 시공오차에 대한 수정이 바로 이루어졌다.

4.4 현장 조립 및 설치

현장 시공 프로세스는 Figure 15와 같다. 구조부재의 순차적 조립 시공은 후속 공정과 간섭이 적게 발생하며, 3차원 좌표에 의한 검측 data를 공유할 수 있어 구조, 마감 두 공정을 동시에 작업할 수 있다.



Figure 15. Manufacturing and construction process of The ARC

CNC Twisted Tube의 철골부재를 조립·설치하고 내화 페인트를 설치한 후 외피 하부 구조를 지상에서 조립한 후 이동식 크레인으로 인양하여 철골구조 부재에 접합한다.

외피 하부 구조위에 방수 피복재인 ETFE를 설치한 후 알루미늄 패널을 설치하여 비정형 외피 시스템을 완성한다. 기존 ETFE와 알루미늄 패널 설치하는 현장에서 골조가 끝나

면 실측을 통하여 수치정보를 확보하고 이에 맞도록 마감 치수로 부재를 제작하여 설치하는 작업 순서로 진행되었으나 본 연구에서 제안한 3차원 좌표 정보를 활용함으로써 이러한 수치상의 오차가 없도록 하였다.

5. 결 론

기존의 비정형 건축구조물의 곡면외피는 제작, 설치, 검측 후 비정형 패널의 부착 오류, 줄눈의 불일치, 곡면의 직선 시공 등의 오류가 매우 빈번히 발생하고 있다. 또한 기존 비정형 건축구조물은 주요부의 높이 검측이 현장에서 이루어지기 때문에 시공의 정밀도가 떨어지고 설계자의 의도와는 다른 형태로 시공되는 문제점이 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 CNC Twisted Tube 공법을 제시하였다.

본 공법을 적용한 대구 대표 물문화관(The ARC)은 철골조의 비정형 건축물로서 10개월의 촉박한 공기로 진행되었다. 이는 본 연구에서 제안한 CNC Twisted Tube 공법을 이용한 비정형 철골 구조물 구축을 위하여 3차원 좌표 제어 기술과 정밀한 공장 제작과 현장 설치로 가능하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 구조 및 시공방법 최적화를 위하여 Digital Fabrication 기법을 통하여 원설계의 종합분석 후 3차원 좌표 제어가 가능한 CNC Twisted Tube 공법을 적용하였다.
- 2) CNC Twisted Tube 공법을 적용한 구조부재는 디지털 최적화와 Mock-up 과정을 거치면서 시공성에 대한 검증을 통한 정밀 제작과 조립 시공을 가능하게 하였으며, 철골부재의 물량 최적화를 실현하였다.
- 3) 3D 좌표 data를 통합 관리함으로써 골조와 마감, 두 가지 공정을 동시에 진행할 수 있다. 해외에서 제작된 ETFE의 특성상 골조가 완료된 후 연결부 측량을 통해 진행하던 제작은 측량없이 3D 좌표 데이터에 의해 바로 제작하였으며, 공기 단축이 가능하였다.

따라서 본 연구의 비정형 건축물의 3차원 좌표 제어 기술은 구조부재와 마감의 시공 정밀도를 향상시켜 건축물의 정확한 형상 구현을 가능하게 함과 동시에 시공 방법 및 시공 물량 최적화, 공기 단축을 통하여 시공비 절감이 가능하다.

요 약

최근 건축은 정형의 건축물의 외관과 설계 범위를 벗어난 비정형의 설계, 시각화, 3차원 모델 구현이 이루어지고 있다. 일반 정형건축물과는 달리 비정형건축물의 지붕과 외벽은 디자인 중심의 외벽시스템과 배수, 방수의 성능을 지닌 지붕마감시스템으로 설계되고 시공되었다. 그러나 비정형 건축물은 외벽과 지붕의 구분이 없어지고 외피로의 개념으로 통합된다. 또한 건축설계의 디자인 트렌드가 정형에서 비정형의 자유로운 형태로 급변하고 있어 각종 현상설계 및 탄키 등 설계경기의 당선을 위하여 비정형의 건축물이 자주 등장하고 있다.

기존 비정형 건축구조물의 곡면외피를 시공하기 위해서는 스틸 각파이프나 C형강으로 비정형 형태를 만들고 거기에 외장을 시공한다. 그러나 이는 공사 기간 지연과 높은 공사 비용이 소요되는 문제점이 있다. 제작, 설치, 검측 후 비정형 패널의 부착 오류, 줄눈의 불일치, 곡면의 직선 시공 등의 오류가 매우 빈번히 발생하고 있다.

이에 본 연구는 3차원 좌표제어 기술의 하나인 CNC Twisted Tube 공법을 적용한 구조체의 시공과정을 면밀히 검토하여 3차원 좌표제어 기술로 비정형 건축물의 구현 방안을 제시한다.

키워드 : 디지털 제작, 비정형건축물, 3차원, 좌표, 컴퓨터 수치제어장치

construction method for freeform building based on BIM, Journal of the Korean Institute of Building Construction, 2012 Jun;12(3):347-57.

3. Park J, Lee M, A study on the application of BIM(Building information modeling) in the field of non-linear forms architecture, Proceeding of Annual Conference of the Architectural Institute of Korea, 2008 Oct 24-25; Gwangju, Korea, Seoul (Korea): the Architectural Institute of Korea; 2008. p. 209-12.
4. Kloft H, Fabricating architecture(selected readings in digital design and manufacturing), New York (NY): Rinceton Architectural Press; 2009. 111 p.
5. Buswell RA, Thorpe A, Soar RC, Gibb AGF, Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction, Automation in Construction, 2008 Mar;17(8):923-29.
6. Schodek D, Bechthold M, Griggs K, Kao KM, Steinberg M, Digital design and manufacturing - CAD/CAM application in architecture and design, Hoboken (Belgium): John Wiley & Sons, Inc.; 2005. p. 13.
7. Eigensatz M, Kilian M, Schiftner A, Mitra N, Pottmann H, Pauly M, Paneling architectural freeform surfaces, Proceedings of Association for Computing Machinery Transactions on Graphics; 2010 July 25-29; New York (NY): Association for Computing Machinery; 2010. Article p. 45.
8. Burrows S, Simpson M, The stadium geometry, The Arup Journal, 2009 Jan;44(1):16-9.

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (No. 2012-0001970).

References

1. Guzik A, Digital fabrication inspired design: Influence of fabrication parameters on a design process [master's thesis], [London]: University College London; 2009. 71 p.
2. Ryu HG, Kim SJ, Case study of concrete surface design and