

# 구조 최적화를 위한 비정형 구조시스템의 인터페이스 기법

## Interface Technique for Optimization of Free-form Structural System

나 유 미\*  
Na, Yoo-Mi

이 재 홍\*\*  
Lee, Jae-Hong

강 주 원\*\*\*  
Kang, Joo-Won

### 요 약

최근 컴퓨터 기술의 발달로 인해 복잡한 형태를 가지는 기념비적인 건축물이 설계, 시공됨에 따라 비정형건축에 관한 사회적 관심이 해외뿐만 아니라 국내에서도 증가하고 있다. 하지만 비정형 구조시스템의 구현하기 위한 기술 및 연구에 대한 사례가 부족하여 많은 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 3D모델링 프로그램과 최적설계를 수행하는 프로그램간의 인터페이스 모듈에 대한 연구를 수행하였다. 3D 모델링 프로그램에서 자동 메쉬를 생성하고, 모델링에 대한 정보를 바로 추출하여 최적화를 수행하였다. 결과적으로 개발된 인터페이스 모듈의 검증에 위해 예제 모델을 선정하여 형상최적화를 수행하였다.

### Abstract

Recently, due to the advanced computer technology, momental architectures have been designed and built using features that are very sophisticated. People's interest in free-form structural system has increased steadily not only nationwide, but also worldwide. However, there were many difficulties in the materialization of free-form structural system owing to the lack of technique and research. To solve this problem, this study performs the interface between the 3D modeling program and the optimization program. In the 3D modeling program, it is possible to automatic mesh generation and immediately to information extraction. It performs the shape optimization. Consequently, this research designs the example model and performs optimization in order to verify the developed interface module.

**키워드 :** 비정형 구조시스템, 인터페이스, 형상최적화

**Keywords :** Free-form structural system, Interface, Shape optimization

## 1. 서 론

최근 컴퓨터와 정보 기술의 발달로 인해 복잡한 형태를 가지는 기념비적인 건축물이 설계, 시공됨에 따라 비정형(Free-form) 건축에 관한 사회적인 관심이 해외뿐만 아니라 국내에서도 증가하고 있다. 그

러한 예로 국내에서는 자하 하디드(Zaha Hadid)의 동대문 디자인 플라자&파크(DDPP)가 시공되고 있다. 또한 디지털 매체의 급속한 발전으로 인해 작가의 창의력을 마음껏 발휘할 수 있는 여지가 마련되었기 때문에 비정형 건축형태가 재현되어질 수 있었는데, 건축적 형상으로서의 비정형이 기술, 특히 디지털 프로그램과의 직접적인 상관관계를 지니게 되었다.

비정형이라는 것은 사전적으로 일정한 형태나 형식이 정하여지지 아니한 것을 의미하고, 비정형 모델링에는 이중 곡선과 불규칙한 형상들이 많이 사용되고 있다. 건축에서의 비정형은 건축가의 상상력

\* 학생회원, 세종대학교 건축공학과 석사과정

\*\* 교신저자, 세종대학교 건축공학과 교수, FREE FORM 건축연구소 공학박사

Tel : 02-3408-3208 Fax : 02-3408-4331

E-mail : jhlee@sejong.ac.kr

\*\*\* 영남대학교 건축학부 교수

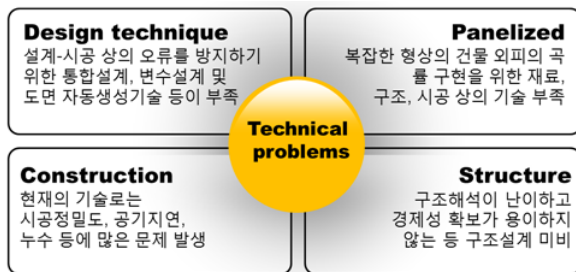


(a) Bilbao Museum, Frank Gehry



(b) Kunsthhaus, Peter Cook

〈그림 1〉 비정형 구조시스템 건축물



〈그림 2〉 비정형건축물 구현의 기술적인 문제점

을 시각적으로 표현하기 위한 기술 및 연구에 대한 사례가 많이 부족하여 많은 어려움이 따르고 있다. 그 중 비정형 구조시스템을 구현하기 위해 필요한 엔지니어링 부분이 해외 기술에 의존하고 있는 것이 현실이다. 구조엔지니어들을 위한 구조해석 도구가 개발되지 않아 건축의 변화에 적절하게 대응하지 못하고 있다. 현재로서는 비정형 모델과 구조해석을 위한 구조정보 모델 사이의 변환을 가능하게 하는 인터페이스가 없기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 3D모델링 프로그램과 구조해석을 수행하는 프로그램간의 인터페이스 모델에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 비정형 구조시스템의 디지털 요소

### 2.1 비정형을 위해 파라메트릭 모델링

비정형 건축의 모델링은 건축가의 상상력을 시각적인 구현과 표현하기 위해 3차원 그래픽 프로그램인 Rhino 3D, Digital Project, 3D Max 등을 사용한다.

또한 대부분의 상업용 CAD 프로그램들은 복잡한 곡면에 대한 수학적 기술 방식으로서 님스(NURBS· Non-Uniform Rational B-Splines)를 적용하고 있으며, 파라미터 방식을 통해 이전에 디지털 툴이 가지고 있었던 정보 처리 한계를 지속적으로 발전시킴에 따라 오늘날 비정형 디자인에 있어 가장 많은 관심을 받고 있는 분야가 되고 있다.

파라메트릭 모델링(Parametric Modeling)이란 상호 관련되는 파라미터와 구속조건을 통하여 해당 지오메트리를 정의하는 방법을 말한다. 이를 통해 하나의 형상을 수정하면 상호 관련되거나 구속된 다른 형상의 사이즈나 위치가 자동으로 변하게 되며 디자인 프로세스의 형상변형에 맞추어 부재의 상세도면이나 부재 데이터 등을 자동으로 추출해낼 수 있다. 사선과 곡선으로 이루어진 비정형 형상을 기하학적으로 정의하여 디지털화 하는 것은 비정형 건축물을 위한 핵심적인 부분이며, 파라메트릭 모델링 기법은 가장 경쟁력 있는 대안이 될 수 있다. 최근 비정형 건축을 위한 파라메트릭 디자인 툴로는 Gehry Technologies에서 개발한 Digital Project를 시작으로 Dassault Systemes의 CATIA, Bentley의 G.C(Generative Component)와 이스라엘의 Eyal Nir가 개발한 Paracloud모델러 그리고 McNeel의 Grasshopper가 서비스 되고 있다.

파라메트릭 디자인 도구가 발전하면서, 많은 건축가들이 이를 활용하여 형태에 대한 다양한 실험을 적극적으로 진행하고 있다. 반면, 구조 엔지니어들을 위한 파라메트릭 구조해석 도구가 개발되지 않아 건축의 변화에 적절하게 대응하지 못하고 있다. 현재로서는 파라메트릭 도구로 제작된 기하정보 모델과 구조해석을 위한 구조정보 모델 사이의 변환을 가능하게 하는 인터페이스가 없기 때문이다.

파라메트릭 디자인은 기존의 디자인 이론, 컴퓨터 이론, 객체지향 등에 기초한 디자인 방법으로, 비정

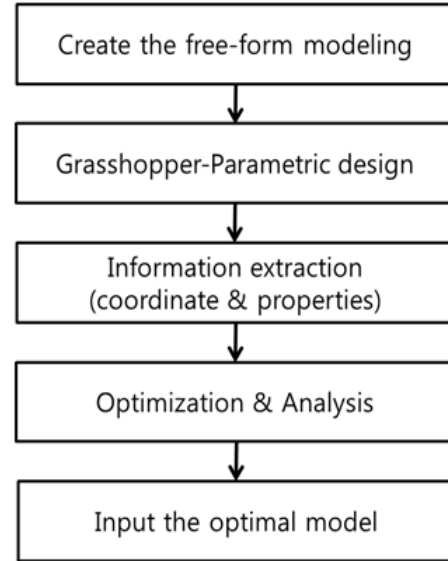
형적이고 자유로운 형상을 쉽게 디자인할 수 있으며, 파라메트릭 방정식을 통해 디자인 요소들의 관계를 설정함으로써, 하나의 논리로부터 다양한 대안을 쉽게 생성할 수 있다. 디자인 과정이 기록되어 있고, 조절할 수 있는 변수들을 가지고 있기 때문에, 완성된 형상을 의도에 따라 쉽게 변경할 수 있다.

## 2.2 Rhinoceros 3D

그리하여 본 연구에서는 비정형 구조시스템의 모델링을 구현하기 위해 Rhinoceros 3D를 사용하였다. 이 프로그램은 넵스(NURBS·Non-Uniform Rational B-Splines)를 기반으로 한 소프트웨어이다. 넵스란 '정형되지 않은 함수의 곡선'이란 뜻으로 NURBS는 상용 CAD/CAM 시스템에서 가장 많이 이용하는 곡선/곡면을 표현하는 방법 중의 하나로, 제어점(control points)과 강도(weights) 그리고 절점(knots) 값들을 조절함으로써 특정형태로 제어된다. 공간 개념적 측면에서 특히 주요한 점은 NURBS의 수학적 기술이 일반적인 X, Y, Z의 데카르트 좌표체계 대신 U, V라는 매개변수 방정식에 의해 정의되는 상대적 매개 공간('local' parametric space) 내에서 재현된다는 것이다. 매개공간 상에서 U, V의 두 가지 차원을 가지게 된 곡면은 U방향과 V방향으로 각각의 단면선(contouring)을 가진 'Isoparametric Curve' 라는 NURBS 곡면에 대한 시각화 기법을 통해 대부분의 상업적 모델링 프로그램들에 적용되고 있다.

### 2.2.1 Grasshopper

Rhinoceros의 plug-in중에 Grasshopper는 생성 디자인 도구를 사용하고 싶지만 프로그램이나 스크립트를 만드는 것에 어려움을 느끼는 디자이너들을 위해 개발된 생성디자인 시스템 플랫폼이다. 디자인 과정 중에 디자이너는 디자인 요소들 간의 정교한 관계를 형성 할 수 있으며, 스크립트, C++ 등의 프로그래밍 언어의 이해를 필요로 하지 않는다. 이런 이유로 Grasshopper는 디자이너가 디자인 문제를 정교한 디자인 요소들과의 관계로 볼 수 있게 해주는 사용자 인터페이스를 제공한다.(Day, 2009)



〈그림 3〉 제안한 인터페이스 기법의 모식도

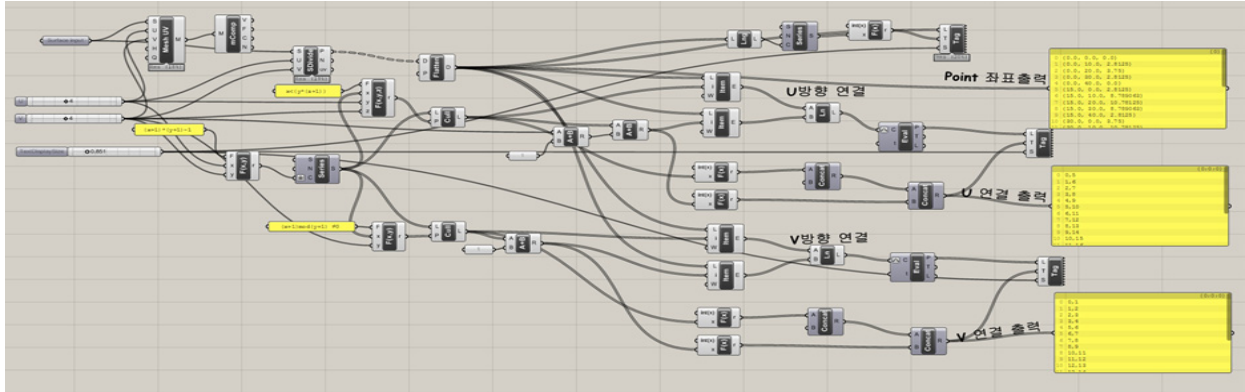
한번 도식화된 grasshopper는 어느 특정 모델의 지오메트리에 한정되지 않고, 여러 모델에 적용이 가능하다. 도식화된 grasshopper의 전체 혹은 부분적으로 재사용이 가능하다. 또한 데이터를 검색하고 저장하는데 외부(Rhinoceros로) 소스를 사용할 수 있다. grasshopper는 복잡한 객체의 생성 모델링 혹은 간단한 객체의 특성에 대한 제어를 하는데 관심을 갖는 누구나 쉽게 접근할 수 있는 툴이다.

## 3. 3D 설계 프로그램과 구조 해석 프로그램간의 인터페이스 방법 제안

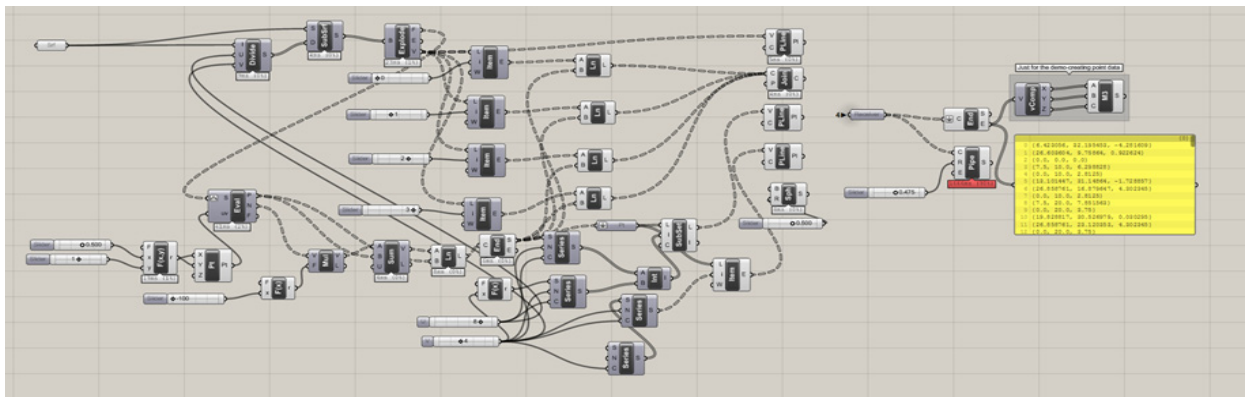
비정형 구조시스템은 비선형적 곡선으로 이루어져 있다. 비선형적 곡선은 해석함에 있어서 난해할 뿐만 아니라 해석 프로그램 상에서의 기하학적 표현마저 많은 시간과 데이터양을 요구한다. 따라서 비선형적 곡면을 입체트러스의 형태로 재구성하여 비정형 트러스 모델의 정보 교환을 위한 인터페이스 방법을 제안하였다. <그림3>

본 논문에서는 인터페이스 방법에 대한 검증을 하기 위해 McNeel의 Rhinoceros 3D에서 Grasshopper 플러그인을 플랫폼으로 사용했다.<그림4>

step 1. 비정형 형태의 다중곡물을 갖는 곡면을



(a) Single-layer truss



(b) Double-layer truss

〈그림 4〉 Mesh생성을 위한 grasshopper 도식화

모델링한다. 이 곡면은 넓스기반의 모델로서 3차원 커브의 형태로 이루어진 곡선이다.

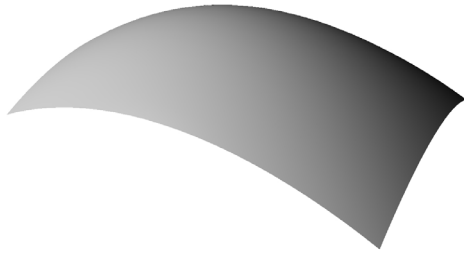
step 2. 넓스기반의 모델은 구조해석에 용의한 유한요소해석의 기반이 되는 메쉬(Mesh)의 형태로 재생성한다. 이때 grasshopper를 도식화 하여 자동적으로 메쉬(Mesh)가 생성되도록 하였다. 메쉬생성과 연관되는 파라미터를 넘버 슬라이드 바(Number Slide Bar)를 이용하여 조절하여 모듈을 원하는대로 생성이 가능하고, 생성된 메쉬는 크기는 일정한 것을 확인 할 수 있다. 그때 생성된 메쉬는 1차 곡선이 되며 트러스 또는 입체트러스의 모델이 된다.

step 3. Grasshopper를 통해 자동으로 생성된 메쉬의 부재(element)는 해석의 부재로 사용되며, 절점(node)에 대한 좌표 및 부재(element)의 연결성(connectivity)에 관한 정보를 직접 얻을 수 있다. 이러한 정보를 가지고 형상최적화 및 구조해석을 수

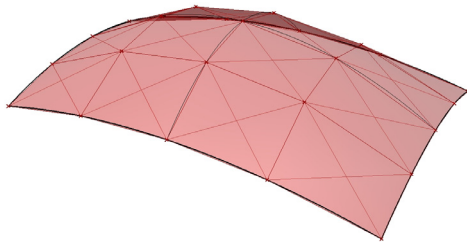
행한다. 최적화된 결과를 가지고 다시 Rhinoceros로 삽입(Import)하여 최적화된 모델을 초기 모델과 비교할 수 있다.

#### 4. 마이크로 유전자 알고리즘

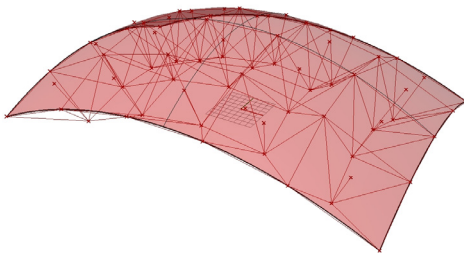
본 연구에서는 비정형 구조시스템의 적절한 부재를 찾기 위해 Krishnakumar가 제안한 마이크로 유전자 알고리즘의 유전 연산자를 수정하여 최적화 하였다. 마이크로 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 방법은 기존의 단순 유전 알고리즘보다 효율적으로 최적단형을 찾을 수 있다. 마이크로 유전 알고리즘은 단순 유전 알고리즘에 비해 더욱 단순한 유전 연산을 사용하므로 단순 유전 알고리즘에서와 같은 까다로운 매개변수 설정을 피할 수 있으며 적은 수의 개체를 사용하므로 개체 증가에 따른 해석시간을 줄일 수 있는 효율적인 알고리즘이다.



<그림 6> 다중곡률을 가진 곡면



(a) 단층 입체 트러스(Single-layer truss)



(b) 복층 입체 트러스(Double-layer truss)

<그림 7> 메쉬(Mesh) 생성

본 연구에서는 마이크로 유전자 알고리즘을 이용한 프로그램을 바탕으로 엘리트 개체를 선별하여 다음 세대에 사용하도록 하여 좋은 개체의 인자를 보존 할 수 있도록 하였다. 그리고 새롭게 생성된 엘리트 개체의 적합도 값이 작을 경우 기존의 엘리트 개체를 유지하도록 하였다. 이러한 과정을 반복 수행을 통해서 제약조건에 따라 최적화를 수행한다.

## 5. 검증예제 및 수치해석결과

본 논문에서는 다중 곡률을 갖는 곡선을 이용한

<표 1> 입체트러스 부재의 물성치

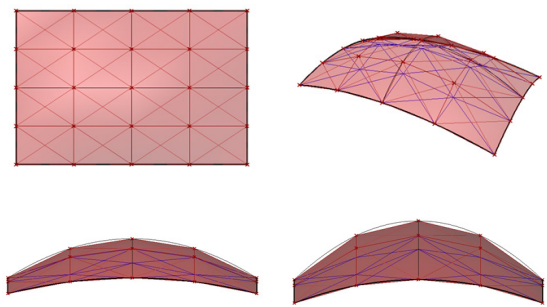
탄성계수 kN/m <sup>2</sup>	항복응력 kN/m <sup>2</sup>	밀도 kN/m <sup>3</sup>
1.6x10 <sup>7</sup>	2.0x10 <sup>4</sup>	0.1

비정형 곡면을 생성하여, 본 논문에 제시된 인터페이스 방법을 이용하여 형상최적화를 수행하였다.

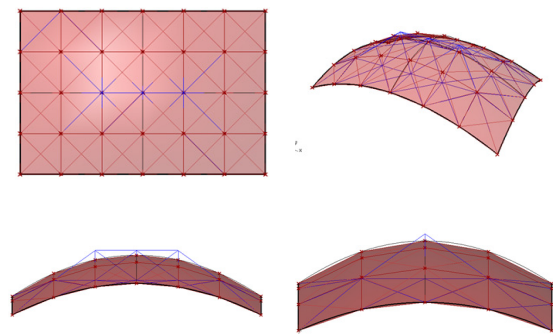
<그림 6>

비정형 구조물을 형상최적화하기 위해 먼저 다중 곡률을 갖는 곡선을 유한요소해석의 기반이 되는 메쉬의 형태로 생성한다. 이는 grasshopper를 도식화하여 곡면을 선택하게 되면 메쉬(Mesh)가 생성되도록 하였다. 메쉬 생성과 연관되는 파라미터를 넘버 슬라이드 바를 이용하여 u, v방향으로 파라미터의 수를 조절하여 메쉬의 크기를 조절할 수 있다. 이때 생성된 메쉬는 1차 곡선이 되며 트러스 또는 입체트러스의 모델이 된다. 본 논문에서는 단층과 복층으로 모델링하여 보았다. <그림 7>

도식화된 grasshopper에서 메쉬에 대한 정보를 얻을 수 있다. 절점(node)에 대한 좌표, 부재



(a) u=4, v=4

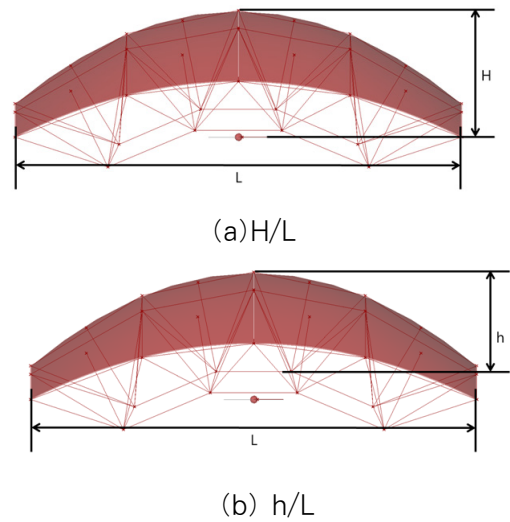


(b) u=6, v=4

<그림 8> 단층 입체트러스 형상최적화 결과

(element) 및 부재의 연결(connectivity)에 관한 정보를 직접 얻을 수 있으며, 이러한 정보를 가지고 형상최적화를 수행한다. 마이크로 유전 알고리즘을 이용한 형상최적화를 수행하기 위해 입체트러스 구조물의 제약조건을 각각의 달리 하여 부재의 허용범위를 고려하였다. 또한 최적화된 결과를 가지고 다시 Rhino로 삽입(Import)하여 최적화된 모델을 확인할 수 있다.

최적화를 수행하기 위한 입체트러스 구조물의 제약조건은 각각의 부재의 허용응력을 고려하여 허용응력이 초과되지 않도록 고려하였으며, 입체트러스의 최적화에 사용된 물성치는 <표1>과 같다.



<그림 9> H/L와 h/L의 정의

### 5.1 단층 입체 트러스(Single-layer truss)

<표 2> 복층 입체트러스 형상최적화 결과

H/L = 0.233			
h/L	0.198	0.213	0.305
Mesh generation			
Optimization			
H/L = 0.283			
h/L	0.198	0.215	0.265
Mesh generation			
Optimization			

단층 입체 트러스를 생성하기 위해 이 논문에서 제안한 grasshopper를 이용하여 자동적으로 생성하였다. v방향으로 파라미터를 4로 같게 하였고, u방향으로는 파라미터를 각각 4와 6인 두가지 예제로 나누어 최적화를 수행하였다. <그림8>

## 5.2 복층 입체 트러스(Double-layer truss)

복층 입체 트러스의 패턴 또한 단층 입체 트러스 처럼 grasshopper를 이용하여 자동적으로 생성하였다. 단층 입체 트러스와는 달리 상부층과 하부층을 잇는 대각부재가 존재하고 있으며 상부의 단위격자 네 가장자리와 그 중심위치의 아래에 있는 하부의 단위격자 절점을 서로 연결하고 있다. 전체적으로 하부의 격자 절점 위에 단위 역피라미드가 연속적으로 펼쳐져 있는 형태이다.

본 논문에서는 복층 입체 트러스에 모델의 총 높이(H)와 상부층과 하부층을 연결하는 대각부재의 길이(h)를 달리 하여 모델을 생성하였다.

검증예제 결과로부터 상용 디자인 프로그램인 Rhinoceros를 이용하여 비정형의 개발된 자동메쉬 생성기법을 이용하여 손쉽게 유한요소망을 생성할 수 있었다. Grasshopper를 이용하여 생성된 메쉬에 대한 정보를 추출하였다. 하지만 h(상부 트러스와 하부 트러스를 잇는 부재의 길이), H(모델의 총 높이)와 L(모델의 총 폭)의 파라미터를 조절하기 때문에, 원하는 치수의 곡률에 대한 형태를 찾기 힘들다. 생성된 메쉬에 대한 정보를 가지고 마이크로 유전 알고리즘을 이용한 형상최적화를 수행하였고, 그 결과를 다시 Rhinoceros에 삽입하여 최적화 된 모델을 <표2>에서처럼 확인할 수 있었다. 이를 통하여 본 논문에서 제안된 인터페이스 기법에 대한 효율성을 검증할 수 있었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 비정형 건축물의 구조시스템 설계를 위한 첨단 디지털 요소기술로서, 형태생성 기법으로 적용되는 파라메트릭 모델링 기법을 이용하여 자동 생성되는 메쉬(mesh)의 정보 활용에 대한 인

터페이스 방법에 대하여 연구를 수행하였다.

기존의 Auto CAD나 ADINA, MIDAS와 같은 상용프로그램에서 비정형 모델의 설계와 수정하는데 많은 시간을 낭비하였고, 유연한 3D 곡면 모델링을 하는데 어려움이 있었다. 그리하여 본 논문에서는 모델링이 변하더라도 유연하게 대처 할 수 있는 grasshopper를 도식화 하였다. 제안한 grasshopper를 이용하여 메쉬의 자동 생성기법은 형상이 변화더라도 다시 수정 할 필요가 없기 때문에 매우 효과적인 것으로 나타났다. 하지만 본 논문에서는 곡률에 대한 정밀도를 표현하기에는 미비한 부분이 있습니다.

또한 본 연구에서는 유연한 3차원 곡면 모델링이 가능한 3D 모델링 프로그램과 최적화를 수행하기 위한 해석프로그램을 연계 시켜주는 인터페이스 기법을 소개하였다. 개발된 인터페이스 모듈의 검증을 위해 예제 모델을 선정하여 최적화 기법인 마이크로 유전알고리즘(Micro Genetic Algorithm :  $\mu$ -GA)을 이용하여 형상최적화를 수행하였다. 하지만 3차원 곡선을 직선 부재로 바꾸어 해석하기 때문에 곡선에 대한 정확한 해석을 수행할 수 없으므로, 추후에는 NURBS곡선에 대한 해석이 가능한 Isogeometric analysis를 보다 심도 깊은 연구가 진행될 필요성이 있다고 생각된다.

## 감사의 글

본 논문은 2010년도 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업(과제번호: NIPA-2010-C615 0-1001-0013)과 2010년 교육과학기술부 재원으로 한국연구재단의 기초연구실 육성사업(BRL)의 지원으로 이루어졌습니다(과제번호: NRF2010-0019373).

## 참고문헌

1. Robert McNeel & Associates(2006), "User Manual for Rhinoceros (Ver 4.0) - NURBS modeling for Windows"
2. 최현철 (2010), "비정형 파라메트릭 디자인의 파라메트릭 구조해석 최적화", 대한건축학회, 제 54권 제 10호, pp 65-68
3. 전유창 (2009), "건축 설계와 시공의 최적화를 위

- 한 도구로서의 파라메트릭 디자인”, 대한건축학회, 제 53권, 제 4호, pp22-26
4. 박정대 (2008), “‘비정형’형상의 디지털 재현”, 대한건축학회, 제 52권, 제 4호, pp36-38
  5. 이상진 (2010), “CAGD를 이용한 프리폼 이산화 공간구조물의 유한요소망 자동생성기법”, 한국공간구조학회논문집, 제 10권, 제 2호, pp77-86
  6. 나유미, 이재홍 (2011), “3D 모델링 프로그램을 이용한 비정형 구조시스템에 대한 인터페이스 기법”, 한국강구조학회 학술대회 발표집, 제 22권, 제 1호, pp3-4
  7. 박홍식, 전한중 (2009), “평면사변형 매쉬기법을 활용한 비정형 건축의 형태 생성 방법에 관한 연구”, 한국문화공간건축학회 논문집, 통권, 제 26호, pp5-12
  8. 윤병욱, 나유미, 이재홍 (2010), “3D 모델링 프로그램을 이용한 프리폼 구조시스템 모델링 기법”, 한국공간건축학회 춘계 학술발표 논문집, 제 7권, 제 1호, pp51-54
  9. 박정대, 김진균 (2004), “G.A기반 디지털 디자인에 관한 고찰”, 대한건축학회, 제 20권, 제 11호, pp51-58
  10. 임진택, 김남웅 (2005), “파라메트릭 모델링 기법을 활용한 설계프로세스개념에 관한 고찰”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제 25권, 제 1호, pp523-526

(접 수 일 자 : 2011년 06월 29일)  
(심사완료일자 : 2012년 02월 20일)  
(게재확정일자 : 2012년 02월 24일)