

Grasshopper를 이용한 Catenary Shell 설계 방법 제안

Design Suggestion of Catenary Shell using Grasshopper Script

이 주 홍*
Lee, Joo Hong

조 아 서**
Cho, Ah Sir

김 상 회**
Kim, Sanghee

강 현 구***
Kang, Thomas H.-K.

Abstract

The objective of this study is to propose methods to design and analyze a catenary shell using a computer program without experiments and measurements. The initial idea stems from Pendergrast's study, but his method should be improved. In this study, the process of making catenary shell using computer was reproduced by Grasshopper script. In order to enhance credibility, two models from Grasshopper script were analyzed by SAP2000; one was just a square-based catenary shell, while the other was the re-created shell originated from the Naturtheater Grötzingen. The outcome of analysis was reasonable.

Keywords : Large space structure, Catenary shell, Algorithm, Grasshopper, Rhinoceros

1. 서론

대공간을 형성하는 방법으로는 강재를 이용한 프레임 구조, 케이블을 이용하는 현수 구조, 천막을 이용한 막 구조, 그리고 콘크리트와 같은 부피가 있는 재료를 이용한 셸 구조가 있다. 이들 중 콘크리트 셸 구조는 강구조에 비해 훨씬 큰 자중을 가지고 있으며, 인장력에 약한 콘크리트 특성상 압축 지배적으로 셸을 디자인해야 한다. 셸에 작용하는 외력에 효과적으로 저항하기 위해서는 적합한 셸의 곡률을 산정해야 하는 등의 문제가 있다¹⁾. 이는 프레임 구조에 비해 설계가 복잡함을 의미한다.

콘크리트 셸을 설계할 때, 반구형, 실린더형의 경우 뿐만 아니라 커티너리 셸(Catenary shell)로 구현

하기도 한다. 커티너리는 실이나 천의 양 끝을 고정하고 중력에 의해 처질 때 발생하는 현수선 혹은 현수면을 일컫는다. 이 곡선 및 곡면을 뒤집은 형상은 중력에 가장 잘 저항하는 형태가 되며, 이러한 형태를 가진 셸 구조를 커티너리 셸이라 한다.

커티너리 셸 설계는 일반적으로 직물을 이용한 현수실험을 수행하여 곡면의 규격과 곡률 등을 실측하고 이를 실제 설계에 반영하는 과정을 가진다. 본 논문에서는 기존의 설계 과정을 대체하기 위하여 Grasshopper를 이용하여 커티너리 셸 구조를 설계하는 방법을 연구하였다.

2. 선행연구

기존에는 커티너리 셸 설계에 있어 Isler의 형태설계법(Form-finding method)을 주로 사용해 왔다²⁾. Isler 본인이 설계한 스위스의 Deitingen Service Station이나 독일의 Naturtheater Grötzingen 등을 비롯하여 다수의 얇은 셸 구조가 이 설계법을 이용하여 제작되었다. 이는 실제로 직물을 현수하고 석고 등을 이용하여 형태를 고정시킨 후, 실측을 통해 설계에 반영하는 방법이다.

* 서울대학교 건축학과 석사과정
Dept. of Architecture & Architectural Engineering,
Seoul National University, Master Student
** 서울대학교 건축학과 박사과정
Dept. of Architecture & Architectural Engineering,
Seoul National University, Ph. D Student
*** 교신저자, 서울대학교 건축학과 교수, 공학박사
Dept. of Architecture & Architectural Engineering,
Seoul National University, Associate Professor
Tel: 02-880-8368 Fax: 02-871-5518
E-mail: tkang@snu.ac.kr

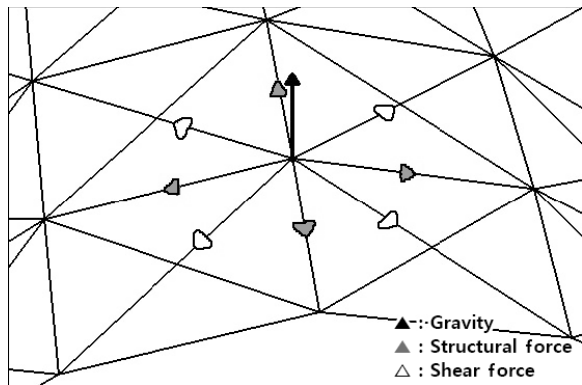
그러나 Isler의 설계법은 컴퓨터를 이용한 설계를 고려하지 않는 방식이다. 형태설계법은 천이나 라텍스 고무를 현수하고 고정하는 아날로그적 방식을 취하는데, 이때 <Fig. 1>과 같은 장치를 이용한다. 기계적 형태설계장비(Mechanical formfinding rig)는 강한 등분포하중을 재하하기 위한 용도이며, 정확한 측정을 위하여 Isler가 만든 측정용 지그(Measurement jig)를 사용한다. Isler의 형태설계법은 그 동안 많이 사용되어 왔으나 그 과정은 복잡하고 어려운 것으로 알려져 있다.

이를 해결하기 위하여 Pendergrast는 기존 직물 현수 실험을 컴퓨터 상의 모의실험으로 대체하는 설계 도구를 개발하였다³⁾. 해당 도구는 독립적인 컴퓨터 프로그램으로서, 시중에 나와 있는 설계 및 해석 프로그램들과의 호환성이 떨어진다. 따라서 Pendergrast의 설계 도구는 개발의 의의만을 가질 뿐 실무에 적용되기는 어려운 것으로 판단된다. Pendergrast 본인도 이러한 한계점을 인정함과 동시에 대안 및 미래의 가능성으로 몇 가지를 제안하



(a) Mechanical form-finding rig (b) Measurement jig

<Fig. 1> Tools for form-finding method⁴⁾



<Fig. 2> Annotation on a portion of a wireframe⁷⁾

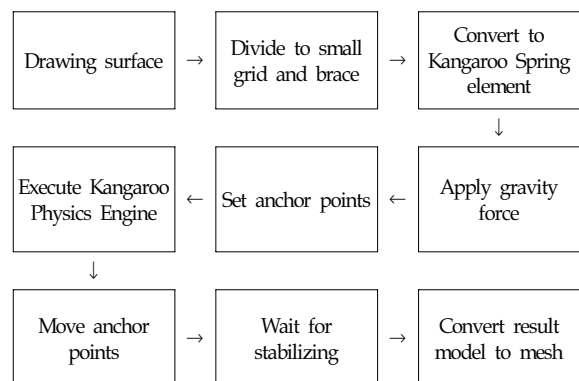
였으며, 그 중 하나가 Grasshopper를 이용한 모의 현수실험의 구현이다.

Grasshopper는 CAD 프로그램 중 하나인 Rhinoceros 5.0의 알고리즘 설계도구이다⁵⁾. Grasshopper는 알고리즘에 따른 구조물 설계에 적합한 프로그램으로서, 국내외에서 패러메트릭 디자인을 비롯한 비정형 구조물 설계나 구조물 최적화와 같은 다양한 연구 분야에 사용되고 있다^{6,7)}. 본 논문에서는 Grasshopper를 이용하여 쉘 디자인 프로그램을 개발하였고, 이를 이용해 커티너리 쉘을 구현하였다. 또한 기존 건물에 대한 해석을 통해 개발 프로그램의 유효성을 검증하고자 하였다.

3. Grasshopper 알고리즘 구현

Pendergrast는 직물의 거동을 컴퓨터상에서 구현하고자 가새가 추가된 사각격자로 와이어프레임을 구성하였다. Pendergrast의 알고리즘에 따르면, 와이어프레임의 노드에 중력이 작용할 경우 <Fig. 2>와 같이 부재에 힘이 작용한다.

이 와이어프레임이 천과 같이 거동하기 위해서는 각각의 요소가 스프링으로 작동해야 한다. 그러나 Grasshopper에는 해당 기능을 탑재하고 있지 않아 Kangaroo라는 플러그인을 추가로 사용하였다. 이는 스프링 부재를 구현할 뿐만 아니라 중력의 적용이나 부재 간에 작용하는 힘을 조절하는 등 다양한 힘에 의한 물리적인 현상을 Grasshopper에서 재현하는데 초점을 맞춘 프로그램이다⁸⁾. 이를 적극적으로 활용해 Pendergrast의 개발 내용을 재현하였다.



<Fig. 3> Flow of Grasshopper script

<Fig. 2>와 같은 와이어프레임이 천의 거동을 나타낼 수 있다는 점에 대해서는 Kangaroo의 개발자가 작성한 매뉴얼에도 기재되어 있다⁹⁾.

Grasshopper 스크립트의 개략적인 절차는 <Fig. 3>에 나타나 있다. Surface를 작은 격자요소로 분할하고 Spring으로 변환하는 과정은 <Fig. 2>와 같은 와이어프레임을 구성하기 위한 것이다. Kangaroo 물리엔진 실행 결과물을 메쉬로 변환하는 작업은 구조해석을 위해 필요한 부분으로, 해당 과정이 없으면 구조해석 프로그램에 적절한 데이터를 입력할 수 없다. 메쉬 변환을 위해 Weaverbird라는 플러그인을 사용하였다. 이는 본래 메쉬 분할 및 변환 연산을 통한 위상수학적 모델링을 위한 도구이나¹⁰⁾, 여기서는 단순히 Kangaroo 물리엔진의 결과물을 메쉬로 변환하기 위해서만 사용하였다.

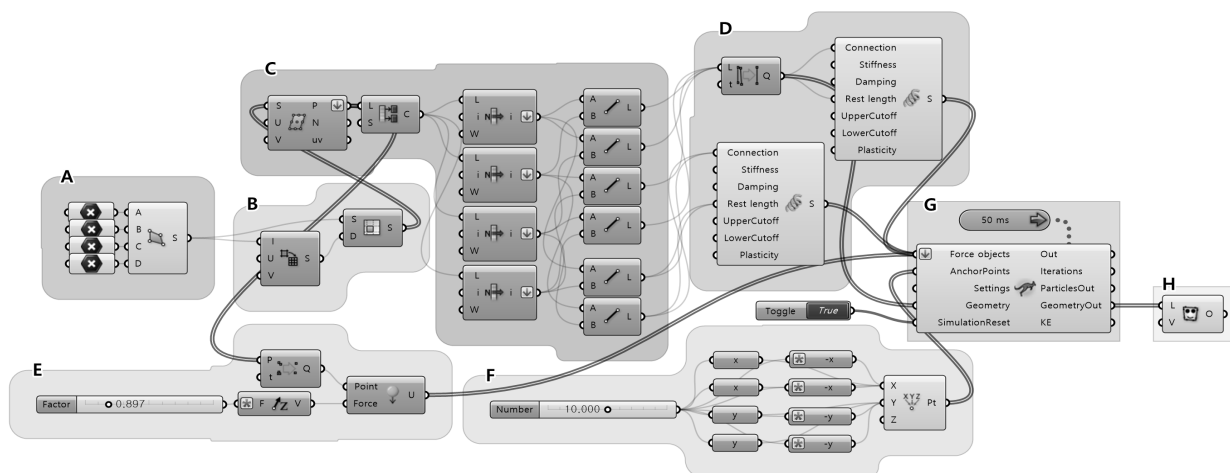
절차에 따른 Grasshopper 스크립트는 <Fig. 4>와 같다. A과정에서 4개의 좌표점을 이용하여 사각형의 Surface를 만든다. 형성된 Surface는 B과정에서 Divide Domain 및 Isotrim 함수를 통해 작은 Surface들로 나누어지며, 작은 Surface들의 크기는 모두 동일하다. C과정에서는 Divide Surface 함수를 이용하여 작은 Surface들의 각 꼭짓점의 위치를 찾은 후, 이를 기반으로 사각격자 및 가새를 그린다. 사각 격자 및 가새는 D과정을 거치면서 천의 가상현수실험이 가능한 Kangaroo Spring 요소로 변환한다. E과정에서는 앞서 C과정에서 구한 꼭짓점들

의 위치에 중력을 적용한다. F과정에서 지표면 고정점의 정보를 만들며, 이 때 Number slider를 이용하여 지표면 고정점의 이동이 가능하도록 만든다. 마지막으로 G과정에서는 D, E, F과정에서 나온 정보를 Kangaroo 물리엔진에 입력하여 가상현수실험을 진행한다. 중력에 따른 와이어프레임의 움직임이 잦아들면 H과정을 통해 이를 메쉬로 변환한다. H과정에서 나온 메쉬 객체는 CAD 프로그램에서 가공할 수 있으며, 이를 구조해석 프로그램에 적용하여 사용할 수 있다¹¹⁾.

4. Pendergrast의 프로그램과 비교

Pendergrast는 C++를 이용해 단독 실행형 프로그램을 제작하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이 경우, 다양한 유저 인터페이스의 제작이 용이하며 하중 적용이나 지점이동 등의 설정이 간편하다는 장점을 가진다. 하지만 실무에서 많이 사용하고 있는 AutoCAD 등의 설계 프로그램은 물론 유한요소해석 프로그램들과의 호환성도 떨어지는 단점이 있다. 또한 사각형의 평면만을 이용해 셸 구조물을 생성할 수 있는 등 매우 제한적이다.

반면 Grasshopper로 구현된 스크립트 프로그램은 CAD 프로그램인 Rhino를 기반으로 실행되기 때문에 타 프로그램들과의 호환성이 보장된다. 또한 각종 모듈을 이용해 C++를 이용한 단독 실행형 프



<Fig. 4> Full Grasshopper script for making the catenary shell from a square plan

로그래밍 못지 않은 사용자 편의성을 제공한다. 손쉽게 알고리즘을 수정할 수 있어 사각형의 평면뿐만 아니라 다양한 평면에 대해서도 커티너리 셸을 생성할 수 있다<Table 1>.

4.1 형태적 비교

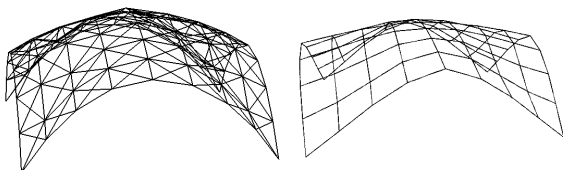
<Fig. 5>에 나타난 (a)와 (b)는 각각 Pendergrast의 프로그램과 Grasshopper 기반 프로그램에 의한 가상현수 시뮬레이션을 통해 얻은 모델이며, 각 셸은 힘의 평형 상태를 이루고 있다. Pendergrast는 시뮬레이션 시작 전에 지표면 고정점의 이동을 미리 수행하였으며, Grasshopper로 구현한 방법에서는 시뮬레이션 시작 후에 지표면 고정점을 이동시켰다. 이 같은 지표면 고정점의 이동 시점이나 프로그램 언어의 차이는 단순한 과정의 문제일 뿐, 두 방식으로 얻어진 셸 모델들 사이에는 유의미한 차이는 없는 것으로 판단된다.

4.2 구조 해석

Pendergrast는 설계에 관한 방법론만을 제안할 뿐, 구조공학적인 분석에 대해서는 언급하지 않았다. 이 때문에 선행연구와의 동등비교는 불가능하지만, 독자적으로 재현한 커티너리 셸에 대하여 구조해석을 수행하였다. 분석에는 유한요소해석 프로그램인

<Table 1> Differences between programs

	Pendergrast	Grasshopper
Language	C++	Grasshopper
Compatibility	×	○
User interface	○	○
Available plan	Square only	All shapes



(a) Pendergrast⁷⁾ (b) Grasshopper

<Fig. 5> Final shape of catenary shell

SAP2000을 사용하였다.

Pendergrast가 제시한 예시 모델의 수치가 존재하지 않으므로, 셸 두께는 임의로 250mm로 가정하였다. 셸 스패는 약 8m 정도이고 셸의 두께는 스패의 1/10 이하이므로, 구조물을 얇은 셸(Thin shell)로 설정하였다. 셸 요소에는 밀도 2.4Ton/m³, 탄성계수 24855.6MPa, 포아송비 0.2, 압축강도 27.6MPa의 콘크리트를 적용하였다. 지반에 닿는 고정점 부분에는 고정단 조건(Fixed restraints)을 적용하여 해석하였다.

<Fig. 6>은 Normal force diagram(이하 NFD)으로, 각 셸 요소에 면내 방향으로 작용하는 평균적인 힘의 크기를 알 수 있다. 해당 부분의 값은 다음의 식과 같다.

$$f_{normal} = \frac{f}{l}$$

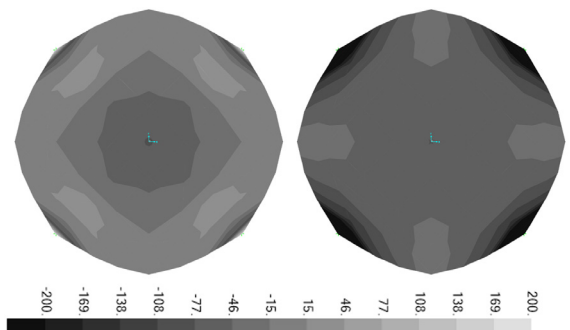
f_{normal} : Normal force (kN/m)

f : 셸 요소 두께의 중간점을 따라 작용하는 힘(kN)

l : 면내 방향의 단위길이(m)

<Table 2> Minimum and maximum value of normal forces (kN/m)

	Local X-axis	Local Y-axis
Minimum	-208.9	-541.2
Maximum	152.0	-19.2

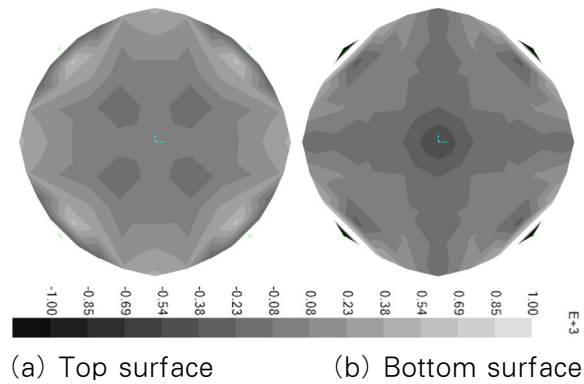


(a) Local X-axis (b) Local Y-axis

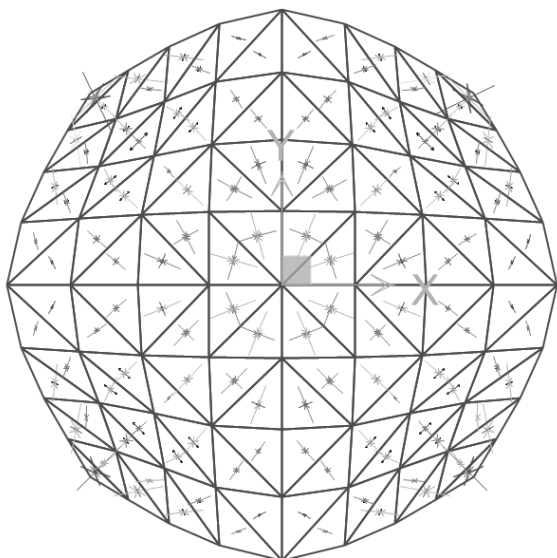
<Fig. 6> Normal force diagram (unit: kN/m)

각 Local 축에서의 최소값과 최대값은 <Table 2>과 같으며, 양수는 인장력을, 음수는 압축력을 의미한다. Local Y축 방향으로서는 인장력이 작용하지 않고 있다. Local X축 방향으로서는 일부 인장력이 작용하고 있으나 그 값이 압축력에 비해 약 20배 작고, 작용되는 면적 역시 압축을 받는 면적의 약 50%에 불과하다. 이렇듯 이 모델은 압축 지배적이므로, 셸로써 충분히 거동하고 있다고 판단된다.

<Fig. 7>은 셸의 윗면과 아랫면에서 작용하는 최대응력을 나타낸 것이다. 최대 및 최소 응력값은 각각 4.54MPa, -3.54MPa이며, 고정점 부근에서 발생하였다. 이는 응력값이 비교적 작기 때문에 철근보강을 통해 충분히 보완될 수 있는 수준이다. 고정단



<Fig. 7> Maximum shell stress diagram (unit: MPa)



<Fig. 8> Stress flow diagram directed by arrows

부근이 아닌 셸 전반적으로는 $\pm 0.2\text{MPa}$ 이내의 응력 분포를 나타내고 있는데, 이는 해당 모델이 셸로써 거동하고 있다는 것을 의미한다.

각 요소에서 최대 및 최소 응력값을 화살표의 길이로, 주요 작용 방향을 화살표의 방향으로 나타내면 <Fig. 8>과 같다. 일부의 인장력이 지지점 근처에 Local X축 방향으로 작용하고 있으나, 모델 전반적으로 압축력이 지배적임을 재확인할 수 있다. 이를 종합하여 볼 때, Grasshopper로 재현한 커티너리 셸 모델은 셸로써 거동하고 있다고 판단된다.

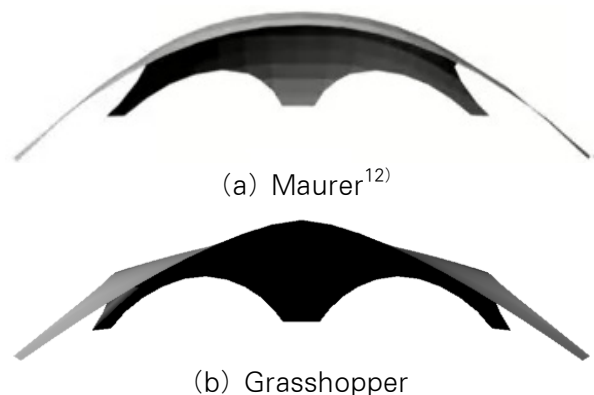
5. 기존 건물과의 비교

Maurer는 Naturtheater Grötzingen 구조물의 형태 뿐만 아니라 구조해석 결과도 명시하였다¹²⁾. 이 건축물은 Isler가 형태설계법을 이용해 직접 설계하였으며, Maurer가 직물 현수실험을 통해 셸 구조를 재현하였다.

본 논문에서는 앞서 개발한 Grasshopper 스크립트를 이용해 Naturtheater Grötzingen 구조물을 모델링하고, 이를 Maurer의 재현모델과 비교하였다.

5.1 형태적 비교

Maurer의 재현 모델 설계과정을 참고하였고, Grasshopper를 이용하여 본래의 구조물을 마찬가지로 재현하였다. 전체 크기는 Maurer의 모델과 동일하게 가로 42m, 세로 28m, 높이 10m로 모델링하



<Fig. 9> Modeling of Naturtheater Grötzingen

였다<Fig. 9>. Grasshopper를 이용한 재현 모델은 Maurer의 모델과 전체적으로 유사한 형태를 보이나, 다리가 유선형보다는 직선으로 뻗어있고 셸의 정점 부근이 뾰족하게 보이는 등 세부적인 차이를 보이고 있다.

5.2 구조해석 결과 비교

Maurer의 해석과 마찬가지로, 모든 영역을 얇은 콘크리트 셸로 설정하였으며 셸 두께는 105mm로 정하였다. 콘크리트의 단위부피당 질량은 2400 kg/m³로, 강도는 28MPa로 설정하였다. 별도의 하중재하는 없으며, 오직 자중에 의한 거동효과를 분석하였다.

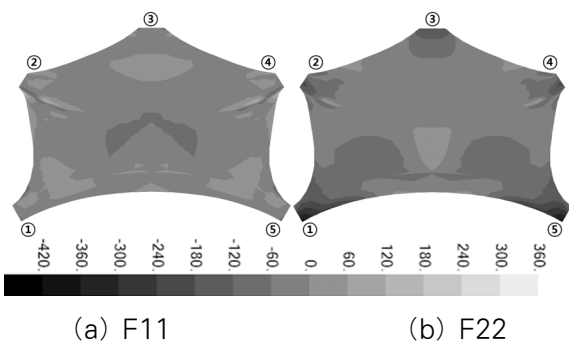
<Table 3>에서 Grasshopper로 재현한 모델은 기존 모델에 비해 압축 혹은 인장에 대한 응력이 최대 인장응력을 제외하면 대부분 2배 이상 더 작게 나타났다. 복잡한 평면도를 기반으로 모델링하였기 때문에 완전히 이상적인 셸의 형태로 나타나지는 않은 것으로 판단된다. 모멘트가 집중되는 다리 및 지

지점 부근 뿐만 아니라, 셸 구조물의 일부 부분에서도 인장력이 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

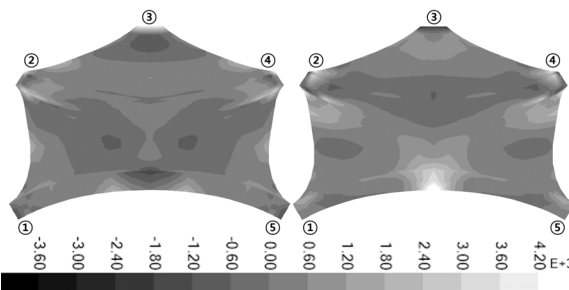
<Fig. 10>에 의하면 인장력은 Local X축 방향으로의 지지점 부근의 굴곡을 따라, Local Y축 방향으로의 지지점 사이에서 아치를 이루고 있는 부분과 셸의 정점 부근에서 작용하고 있다. 개발 모델에서 해석된 결과에 따르면 셸 요소에서의 평균 인장력은 약 5~20kN/m, 압축력은 약 -50kN/m, 셸 전체의 최대 압축력은 -478.1kN/m, 인장력은 393.3kN/m로 나타났다. 힘의 크기와 더불어 압축력이 작용하는 면적이 인장력이 작용하는 면적보다 넓게 나타났다. 반면 Maurer의 해석결과에서는 Grasshopper 재현 모델 대비 두 배가 넘는 힘이 작용하고 있다. 즉, 동일 셸에 대하여 인장력은 2.9배, 압축력은 5.8배로 나타났다.

<Fig. 11>을 살펴보면 주로 2번, 4번 지지점 부근, 그리고 1번과 5번 지지점 사이에서 이루어지는 아치의 정점에서는 가장 큰 인장 및 압축 응력이 작용하며 최대 모멘트가 발생한다. 특히 2번, 4번 지지점 근처에서는 <Table 3>에서 표시된 가장 큰 인장 응력인 8.1MPa이 작용하고 있다. 1번과 5번 지지점 사이에서는 약 5.6MPa 정도의 인장력이 발생하고 있다. 콘크리트가 일반적으로 2MPa 이상의 인장력에서 파괴되는 것을 생각할 때, 이 부분에서의 철근 보강은 필수적이라고 판단된다.

<Fig. 12>에서 나타난 것처럼, Maurer의 응력 해석 결과와 절대값을 비교해보면 Normal force만큼 큰 차이는 아니더라도 이 부분에서도 역시 차이가 나타나 있다. 최소 응력도에서의 인장응력을 제외한 나머지 경우에서 모두 큰 차이를 보여주고 있으며,



<Fig. 10> Normal force diagram (kN/m)



(a) Top surface (b) Bottom surface
<Fig. 11> Maximum shell stress diagram (MPa)

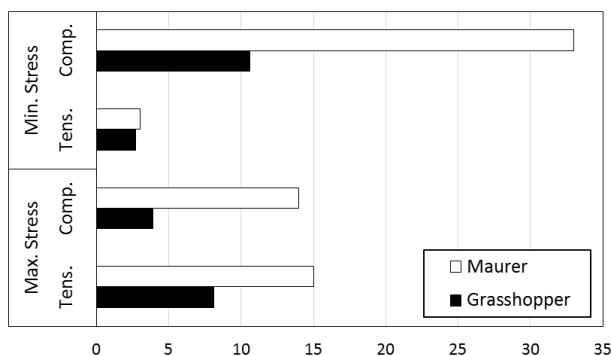
<Table 3> Comparison of forces and stresses of two models

	Grasshopper		Maurer12)	
	Tens.	Comp.	Tens.	Comp.
Max. normal force (kN/m)	393.3	-478.1	1152	-2785
Max. stress (MPa)	8.1	-3.9	15	-14
Min. stress (MPa)	2.7	-10.6	3	-33

Grasshopper로 재현한 모델의 해석결과가 Maurer 재현모델의 해석결과보다 모든 경우에 대해 더 작은 응력수치를 나타내고 있다. 특히 압축응력에 대해서 Grasshopper가 최대 3.5배까지 더 작은 결과를 보인다.

Maurer는 그의 재현모델이 일부 제대로 반영되지 않은 부분이 있다고 언급하였는데, 본래 Naturtheater Grötzingen에는 복곡률(Double curvature)이 존재한다. 그의 재현 모델에서는 Shell element를 매우 크게 설정하고 있다. 쉘 요소의 크기가 대략 3m 정도로, 쉘의 곡률을 제대로 반영하기는 어렵다. 반면, Grasshopper에서 재현한 모델은 크기가 1m 정도이므로 곡률을 좀 더 정확하게 표현할 수 있으며 실제로 재현모델에서도 실제 건물의 아치부분에 나타난 것처럼 복곡률이 나타나고 있다. 한편 Maurer의 재현모델은 천정점 부분이 쉘의 중앙부에 위치하고 있는데 이는 실제 구조물에서도 그렇다. 하지만 본 논문에서 사용한 Grasshopper 재현 모델에서는 그 위치에 일부 차이가 있다.

형태적, 해석적 차이가 있음에도 불구하고, 두 가지 방법 모두 구조해석 결과를 통해 쉘로써 제대로 작동하고 있음을 알 수 있다. 어느 쪽이 우수하다거나 신빙성이 있다고 할 수는 없으나, 본 구조물의 재현에 한해서는 Grasshopper 재현 모델이 훨씬 더 나은 결과를 보이고 있다.



〈Fig. 12〉 Comparison between Maurer and Grasshopper (MPa)

6. 결론

기존에 쉘을 설계할 때는 Isler의 형태설계법을 사용하여 왔다. 그러나, 형태설계법은 어렵고 번거로운 부분이 많을 뿐만 아니라 컴퓨터를 이용한 설계에 적합하지 않다. Pendergrast는 이러한 점을 개선하기 위하여 컴퓨터를 이용해 커티너리 쉘을 생성하는 프로그램을 개발하였으나, 이 프로그램은 보완해야 할 점이 많다. 본 연구에서는 Grasshopper를 이용하여 같은 원리로 커티너리 쉘 구조물을 생성하는 프로그램을 작성하였다. 이를 진행하는 과정에서 밝혀진 연구 결과는 다음과 같다.

1. Pendergrast의 프로그램과 Grasshopper를 활용하여 작성한 프로그램 각각을 이용해 설계된 커티너리 쉘 모델에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.
2. Grasshopper를 이용하여 설계한 커티너리 쉘 모델은 구조적인 쉘로써 거동하였다.
3. Naturtheater Grötzingen 구조물에 대하여 기존 Isler의 형태설계법을 이용하여 재설계한 Maurer의 모델링과 Grasshopper를 이용하여 재설계한 모델링에는 일부 차이가 있었으나, 두 모델링 모두 쉘로써 거동하였다.
4. Maurer의 모델링과 본 연구에서의 모델링은 모두 실제 구조물에 대한 일부 사항을 가정하여 재설계한 것으로서, 완벽하게 실제 구조물과 동일하지는 않았으나, 본 연구에서의 모델을 구조 해석하여 분석한 결과 구조물에 작용하는 응력의 수치가 더 작게 나타났다. 특히 압축응력에 대해서는 최대 3.5배까지 더 작은 결과를 나타내었다.

본 연구에서의 구조해석은 보통강도 콘크리트가 적용된 쉘에 자중만 작용된다고 가정하여 수행하였는데, 천장에 설치되는 장비 등의 고정하중, 설하중, 지진하중 등 추가하중에 대하여 비선형해석 및 내진해석 또한 수행되어야 할 것이다. 특히 얇은 쉘(Thin shell) 적용 시 초고성능콘크리트(UHPC)를 적용하는 방안도 고려할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Kim, S. D. and Lee S. W., "A Study on Optimum Shape Finding of Shell-Typed Structures", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 8, No. 2, 2008, pp. 105-113.
2. Isler, H., "New Shapes for Shells", Bulletin of the International Association for Shell Structures, No. 8, Paper C-3, 1961.
3. Pendergrast, R. A., "Thin Shell Structure Design Tool", Master Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, 2010.
4. Chilton, J., "Form-finding and Fabric Forming in the Work of Heinz Isler", Proceedings of Second International Conference on Flexible Formwork (ICFF 2012), 2012, pp. 84-91.
5. Davidson, S., "Grasshopper - Algorithmic Modeling for Rhino", 2015, Retrieved from <http://www.grasshopper3d.com>
6. Kim, C. G., Lee, S. S. and Choi, H. C., "A Study on Parametric Modeler to Generate Structural Analysis Model", Proceedings of the Computational Structural Engineering Institute Conference, Vol. 23, No. 1, 2010, pp. 247-250.
7. Kim, C. G., Lee, S. S., Choi, H. C. and Lee, J. C. "A Study on Parametric Modeling for the Analysis of Irregular Large Space Structures", Proceedings of the Computational Structural Engineering Institute Conference, Vol. 24, No. 1, 2011, pp. 18-21.
8. Piker, D., "Project Kangaroo - Live 3D Physics for Rhino/Grasshopper", 2010, Retrieved from <https://spacesymmetrystructure.wordpress.com/2010/01/21/kangaroo/>
9. Piker, D., "Kangaroo Manual", 2014, Retrieved from https://docs.google.com/document/d/1X-tW7r7tfC9duICi7XyI9wmPkGQUPIIm_8sj7bqMvTXs/edit
10. Piacentino, G., "Weaverbird - Topological Mesh Editor", 2009, Retrieved from <http://www.giuliopiacentino.com/weaverbird>
11. Abell, M., "Import DXF into SAP2000", CSI Knowledge Base, 2012, Retrieved from <https://wiki.csiamerica.com/display/sap2000/Import+DXF+into+SAP2000>
12. Maurer, T., O'Grady, E., and Tung, E., "Inverse Hanging Membrane: The Naturtheater Grötzingen", Evolution of German Shells Efficiency in Form, 2013, Retrieved from <http://shells.princeton.edu/Grotz.html>

- Received : February 25, 2016
- Revised : May 03, 2016
- Accepted : May 18, 2016