

개폐식 대공간 구조물의 파라메트릭 설계와 풍하중 적용

김시욱¹ · 정보라² · 김치경^{3*} · 이시은⁴

¹단국대학교 건축공학과 박사과정, ²단국대학교 건축공학과 연구원, ³단국대학교 건축공학과 교수, ⁴백석대학교 정보통신학부 교수

Parametric Design and Wind Load Application for Retractable Large Spatial Structures

Si-Uk Kim¹, Bo-Ra Joung², Chee-Kyeong Kim^{3*} and Si Eun Lee⁴

¹Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Dankook Univ., Yongin, 16890, Korea

²Researcher, Department of Architectural Engineering, Dankook Univ., Yongin, 16890, Korea

³Professor, Department of Architectural Engineering, Dankook Univ., Yongin, 16890, Korea

⁴Professor, Department of Information & Communication System, BaekSeok Univ., Cheonan, 31065, Korea

Abstract

The purpose of this study is to model and analyze retractable large spatial structures by applying parametric modeling techniques. The modeling of wind loads in the analysis of typical structures including curved surfaces can be error-prone, and the processing time increases dramatically when there are many types of variables. However, the method based on StrAuto that was developed in previous research, facilitates the efficacious assignment of wind loads to structures and the rapid arrival of conclusions. As a result, it is possible to compare alternatives with various loads, including wind loads, to determine an optimal alternative much faster than the existing process. Further, it is almost impossible to directly input the wind load by calculating the area of an irregularly curved surface. However, the proposed method automatically assigns the wind load, which allows for automatic optimization in a structural analysis system. The approach was applied and optimized using several models, and the results are presented.

Keywords : retractable large spatial structure, wind load, parametric modeling, StrAuto, automation of structural analysis

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 필요성

대공간 건축 프로젝트는 과거에 비해 점점 많이 착수되며 그 형태 또한 다양해져 그 지역의 랜드마크가 되어 있다. 한 번 지어지면 넓은 건축면적을 필요로 하는 만큼 많은 사람이 수용되며, 전천후 이용 가능한 다목적 공간으로 활용하고자 하는 수요가 늘고 있다. 또한, 다양한 형태로 사람의 이목을 끌며 이에 따른 관광수입도 기대해 볼 수 있다. 특히 대공간 개폐식 지붕 구조를 갖는 건축물은 선진국에 의해 주도되고 있으며, 국내의 경우 미국, 일본에 비해 그 기술이 성숙한 단계에 이르기 위해

서는 다소 시간이 걸릴 것으로 예상된다. 국내의 기술발전이 더딘 것에 비해 해외에서는 개폐식 지붕은 많은 대공간 프로젝트에 적용되며(Kang *et al.*, 2014), 날씨의 변화에도 개폐 상태를 조절하여 대응할 수 있다. 하지만 다양한 모습의 지붕이 설계되어 평지붕형태가 아닌 비정형 대공간 개폐식 건축물에 대한 설계변경과 그에 따른 구조해석은 현 시점에도 일일이 부재 단위로 바꾸어서 변경이 이루어져야 한다. 따라서 다양한 하중에 의한 검토가 불편한 것이 현실이다. 특히, 비정형 곡면 상에서 절점과 절점 사이의 부재형상이 일정하지 않으므로 3차원 공간에서 부재의 시작점과 끝점 이외에도 많은 정보가 필요하며, 사람에게 의한 수동작업을 수행하기 위해 구조해석 프로그램의 모델링 기법으로는 많은 시간이 소요된다. 또한, 설계 변경 발생

* Corresponding author:

Tel: +82-31-8005-3760; E-mail: cheekim@dankook.ac.kr

Received April 8 2019; Revised May 29 2019;

Accepted October 7 2019

©2019 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

시 추가되는 작업량도 방대할 수밖에 없다(Jeong *et al.*, 2018).

한국풍공학회에서 개정 작업한 건축구조기준(KBC, 2016)은 현업에서 발생하는 문제점 위주로 수정 및 보완하여 개정되었다. 풍하중의 경우, 이전의 건축구조기준에서는 주 골조설계용 및 외장재 설계용 풍하중의 산정방법을 적용할 수 있는 범위를 제시하지 않아 실무에서 모든 형상의 구조물에 적용할 수 있는 것처럼 오해하는 경우가 빈번하였다. 반면, 개정된 건축구조기준에서는 풍하중 산정식을 적용할 수 있는 범위를 명확하게 제시하였고, 기존에 풍압(력)계수가 정의되어 있지 않았던 것들을 풍동실험결과 및 해외기준을 참고하여 돔 지붕에 대한 계수를 규정하였으며, 아치지붕면의 풍압계수의 적용 구역을 풍향에 따라 세분화하였다. 또한 공간 개방정도에 따라 계수를 달리 적용하여 다양한 형태에 대응할 수 있도록 하였으며, 밀폐형 및 개방형 대공간 구조물 지붕의 풍압계수의 설계풍압을 산정하는 방법이 포함된다. 이와 같은 개정사항에 따라 자동으로 풍압계수를 산정하는 컴포넌트를 개발하였다(Ha, 2016).

해외 논문에 따르면 개폐식 대공간 구조물이 풍하중에 대한 영향을 평가할 때 개폐의 정도에 따른 건축물의 형상에 의해 발생하는 와류의 영향 및 진동을 고려하는 연구가 많이 진행되고 있다(Blaise *et al.*, 2011). 대공간 건축물의 건설 사례를 살펴보면 설계 단계에서 구조적 안전성과 성능 확보를 위하여 일반 건축물에 비하여 고려할 이슈가 많고 고난도 기술이 요구됨을 알 수 있다. 비슷한 주제의 국내 연구도 있으나 연구의 진행이 초기단계인 경우가 대부분이다.

1.2 연구의 목표 및 내용

선행연구(Jeong *et al.*, 2018)에서 개발된 RSAuto는 개폐식 대공간 구조물 파라메트릭 모델링 모듈을 중심으로 구조해석 연동 모듈, 성능 및 경제성 평가 모듈, 대안 생성 모듈 등으로 구성된다(Fig. 1).

본 연구는 RSAuto 모델러가 제공하는 모델링 컴포넌트를 이용하여 형상에 기반을 둔 3차원 파라메트릭 모델을 구축하고, 풍하중 벡터 값을 자동 생성하여 할당하고 해석 후 다양한 대안 창출과 성능 비교를 통하여 성능과 경제성이 향상된 설계안을 탐색하는 프로세스를 구축한다. 이를 통하여 전통적 구조설계 프로세스에 의한 개폐식 대공간 구조물 설계보다 성능과 경제성이 향상된 설계 결과를 빠른 시간 안에 획득할 수 있도록 하는 것을 목표로 하였다.

본 논문에서는 개정된 건축구조 기준에 따라 풍하중 자동산정 컴포넌트를 개발하고, 건축물에 가해지는 풍하중에 대해 부재력을 계산 후 물량 최적화를 수행하였다. 본 연구에서 개발된

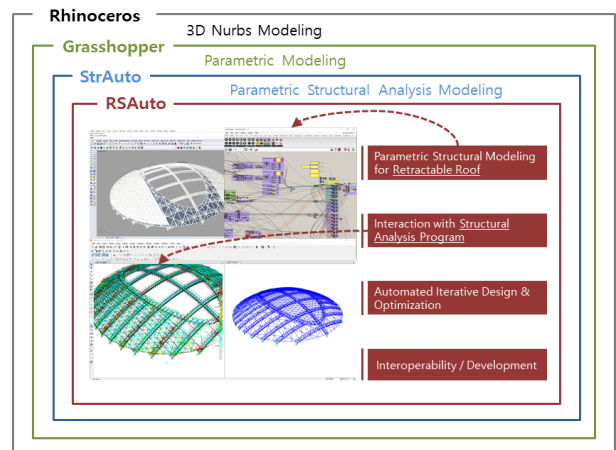


Fig. 1 Configuration of parametric structural design system

풍하중 자동산정 컴포넌트(wind load calculator)를 통해 본문에서는 정적풍압을 적용하여 하중조합에 적용하였으며, 이를 통해 일일이 풍하중을 입력하는 과정을 간소화하였다.

1.3 파라메트릭 구조설계 환경

파라메트릭 설계를 지원하는 3D 모델링 상용플랫폼은 Rhinoceros, Revit, ArchiCAD 등 여러 가지가 있다. 본 고(考)에서 이용한 Rhinoceros는 API(application programming interface)를 사용자에게 제공하여 Nurbs Modeling 방식의 유연하고 강력한 3차원 형상 모델링 기능을 활용한 추가 기능개발이 용이하다. 파라메트릭 모델링 엔진은 Rhinoceros 내에 포함된 Grasshopper를 이용하였다. 파라메트릭 설계는 파라메터로 정한 형상정보를 남겨 추후에 설계이력에 다시 관여할 수 있는 장점이 있다. 이는 반복적인 규칙성이 있는 모델링을 하기에 용이하다(Choi, 2014).

파라메트릭 구조설계(parametric structural design)는 설계안 변경에 의한 수작업을 형상에 구애받지 않고 어떠한 구조든 반복구조해석을 쉽게 할 수 있다고 착각하기 쉽다. 하지만, 사실은 형상에 구애받지 않는 것은 아님을 알 수 있다. 이유는 파라메터를 통해 하나씩의 부재를 조정하는 것은 오히려 작업량이 기존보다 많아짐을 의미하며, 파라메터에 의한 일률적인 조정을 하는 방식을 이용하기 때문에 반복작업을 덜 수 있는 것이 장점으로 작용하기 때문이다(Kim *et al.*, 2012). 개폐식 대공간 건축물 설계에는 대공간의 특성상 반복적이며 규칙적인 형상이 많으므로 이러한 파라메트릭 모델링의 특성을 적용하여 단순하게 반복되는 작업을 획기적으로 줄여줄 수 있다. 하지만 건축물 구조설계를 위한 관련 설계도구 및 기술은 일반화되지 않은 상황이며 일부 엔지니어 또는 일부 프로젝트에 제한적으로 적용되고 있다. 구조설계 분야에서 파라메트릭 설계

도입이 활성화되지 않고 있는 것은 구조계획, 구조해석, 성능 검토, 부재 상세설계 등 전문적인 구조설계 업무를 지원하는 파라메트릭 설계도구 개발이 미진하기 때문으로 판단된다.

따라서, 건축구조물을 대상으로 파라메트릭 모델링과 최적 설계 시스템 개발은 기존의 범용 파라메트릭 설계기술 환경을 기반으로 하여 파라메트릭 구조 모델링 및 최적설계를 위하여 필요한 요소기술들을 개발하여 파라메트릭 구조설계 프로세스를 구축하는 방법으로 개발될 수 있다.

선행연구에 의해 개발된 스트라우토(StrAuto)는 상용구조 해석프로그램 SAP2000과 연동하여 구조체 형상을 제어하는 파라미터를 관리하며, 자동으로 구조해석을 위한 모델을 생성하고, 이에 대해 해석조건을 설정하고 모델의 구조적 안정성을 평가한다(Choi, 2014). 그 이후 연구에서는 이와 같은 프로그램을 대공간 건축물에 특화하여 효과적으로 사용할 수 있도록 RSAuto를 개발하였다(Jeong *et al.*, 2018). RSAuto의 입출력 데이터는 크게 사용자 입력부분과 해석 모델에서 자동 추출되는 두 영역으로 나뉘며, 구조해석은 상용 프로그램인 SAP2000과 연동되어 해석결과를 불러올 수 있다. 여기서, 출력 데이터로는 구조물의 특성을 나타내는 질량, 주기, 진동수 및 변위, 부재력 등이 있다. 본 논문에서 도출된 부재 응력비 등은 해석 프로그램의 부재 자동설계 기능을 이용하여 하중조합 조건에 의하여 산출된 계수하중 및 설계코드를 기준으로 설계 되었음을 미리 언급한다. 이어서 본 연구에서는 RSAuto의 기능을 개선하고 추가해석 모듈 및 모델링 모듈을 개발하여 풍 하중에 대한 상세해석을 수행함과 동시에 사용자의 편의성을 개선하여 적은 수의 입력값을 통해 더 정확한 값을 도출해 낼 수 있도록 하였다. 이렇게 개선한 프로그램의 명칭을 Roof Structure Dynamic(이하 RSDynamic)이라고 명명하였다.

2. 본 론

2.1 개폐식 대공간 건축물의 설계풍압 산정

풍하중은 주골조설계용 수평하중과 지붕하중, 외장재설계용 풍하중으로 구분하여 설계풍압에 유효수압면적을 곱하여 산정하게 된다. 주골조설계용 설계풍압은 설계속도압, 가스트영향 계수, 주골조설계용 풍압계수, 풍력계수를 곱하여 산정하며, 부분개방형건축물 및 지붕풍하중을 산정할 때에는 내압의 영향도 고려해야 한다. 본 연구에서는 예제모델의 형태에 따라 건축구조설계기준(KBC2016)에서 제시한 돔지붕에 대한 외압 계수를 사용하여 설계풍압을 산정하였다(Fig. 2). 실제 현업에서는 구조기준을 따르거나 풍동실험을 하여 풍압계수를 도출하는 것이 일반적이며, 풍동실험을 할 수 없는 경우, CFD해석

결과와 비교하는 등의 과정을 거치고 있다(Blaise *et al.*, 2013).

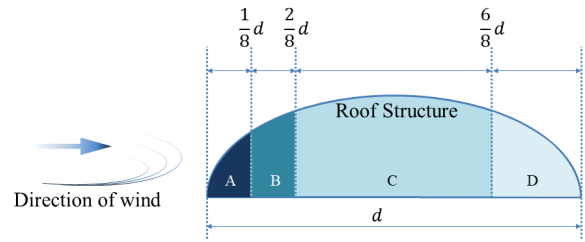


Fig. 2 Wind load zoning of enclosed and partially open buildings for roof framing

본 연구에서는 기준에 따라 밀폐형 및 개방형 대공간 구조물 지붕의 풍압계수의 설계풍압을 산정하고 자동으로 그 값을 입력하도록 하여 수작업의 시간과 노력을 줄이도록 한다. Fig. 3과 같이 일정한 속도로 불어온 바람이 구조물의 표면에 부딪히면, 구조물의 앞 표면에는 누르는 풍압(정압)이 발생하고 구조물의 뒤 표면에는 당기는 풍압(부압)이 발생하게 되어 구조물 전체는 바람으로부터 정압과 부압을 받는다. 이 때, 지붕 구조물의 형상은 풍압의 변화를 좌우하는 요소로 작용한다(Blaise *et al.*, 2011). 따라서, 본 논문에서의 설계풍하중은 구조물의 지붕형상이 대칭되면서도 각각 상이한 경우가 되도록 동-서방향, 남-북방향 2가지 풍방향의 경우를 고려하였다.

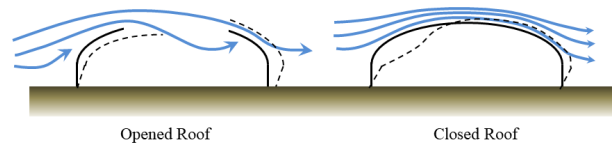


Fig. 3 Effect of wind load by the shape of the roof structure

2.2 개폐식 대공간 건축물의 지붕 구현

기존 연구에서 개폐식 대공간 건축물의 지붕 형태는 개폐방법에 따라 수평지붕 슬라이딩 시스템, 원형 지붕 슬라이딩 시스템, 돔 지붕형 슬라이딩 시스템, 돔 지붕형 회전 시스템으로 크게 4가지로 분류하였다(Jeong *et al.*, 2018). 위 4가지 시스템 중 본 연구에서는 돔 지붕형 슬라이딩 시스템(dome roof sliding system)을 가지는 예제건물을 모델링하여 개발한 컴포넌트를 적용하고, 제시한 파라메트릭 구조설계 프로세스에 따라 예제건물을 생성하였다.

예제로 삼은 모델은 오이타 현에 위치한 O Dome의 지붕 구조물이다(Fig. 4). 지름 약 270m, 돔 지붕형 슬라이딩 시스템을 가진 입체트러스 구조물이며, 2001년 3월에 준공되었다(Table 1). 이 구조물을 예제로 선정한 이유는 1)기존의



Fig. 4 O dome, oita prefecture

연구에 삼았던 예제 구조물과 비교하여 실존하는 건물로 연구를 진행하고자 하였으며, 2)기준에 수행한 연구의 직사각형의 개폐식 대공간 구조물과 비교하여 형상이 비정형성을 띠며, 3) 타원형 개구부의 형상으로 인해 구조설계기준에서 규정하고 있는 풍압계수 시험적용이 가능하기 때문이다.

Table 1 Summary of O dome

Name of structure	O DOME
Location	Oita city, Oita Prefecture, Japan
Size	Max height 57.46m, Circular steel structure diameter 405m(Field : 107m×71m)
Roof	Diameter 274m, circumference 800m Steel pipe frame structure
Structure type	Main structure : 3D(triangular shape) truss, steel pipe Finishing surface(Roof included) : PTFE Column : Concrete structure with Seismic performance
Type of roof system	Dome roof sliding system(Wire traction system - time taken open and close : 20min)
Gross area	92,882m ² (3F, B2F)
Roof area	29,000m ²
Quantity of steel used	12,500ton(Roof structure : 2,000ton)

모델링에 앞서 트러스의 구조물을 모델링하기 위해 X축 트러스, Y축 트러스, 링 트러스, 지붕구조물 등으로 세분화하여 Table 2 및 Fig. 6과 같이 구조부재 그룹을 나누었다. 이는 현재 구조부재의 단면과 재료에 의해 나뉘지는 종류보다 세세하게 나누었는데, 이는 부재와 부재가 만나는 점을 기점으로 최적화 단계의 효율성을 고려하기 위해 하중이 집중되는 부분이나 분담면적이 큰 부분을 고려하여 자세하게 나누었다.

풍하중을 분담하기 위한 지붕구조물을 모델에 엮기 위해서는 각 지붕의 분담면적마다 구조체와 연결할 수 있는 탄성연결요소(elastic link element)가 필요하다. 지붕이 개폐되는 특성에 따라 트러스에 차륜을 얹어 구동하게 된다. 이 때 발생하는 차륜 하중은 이동하중으로 취급된다. 수직하중으로는 최대 차륜

Table 2 O Dome modeling member list

Type	Explanation	No.	Member group
X-Axis truss	Truss in the ellipse	1-(a)	X_Axis_inEllipse_Main X_Axis_inEllipse_Diagonal
	Truss out of the ellipse	1-(b)	X_Axis_outEllipse1_Main X_Axis_outEllipse1_Diagonal
		1-(c)	X_Axis_outEllipse2_Main X_Axis_outEllipse2_Diagonal
	Truss irrelevant to the ellipse	1-(d)	X_Axis_End_Main X_Axis_End_Diagonal
Y-Axis truss	Truss in the ellipse	2-(a)	Y_Axis_Middle_Main Y_Axis_Middle_Diagonal
	Truss out of the ellipse	2-(b)	Y_Axis_End_Main Y_Axis_End_Diagonal
Ellipse truss	Middle parts	3-(a)	Ellipse_Middle_Main Ellipse_Middle_Diagonal
	End parts	3-(b)	Ellipse_End_Main Ellipse_End_Diagonal
Roof truss	Roof truss of fixed parts	4	Roof
Retractable roof truss	Roof truss of moving parts	5	Retractable_Roof

하중과 충격하중, 주행방향인 부재의 수평방향으로 제동력에 의한 하중이 하부 구조물에 전달된다(Fig. 5).

개폐식 지붕 입체 트러스의 자동 모델링 및 동적해석 모델 연계 컴포넌트에는 지붕이 개폐되면서 입체트러스의 레일을 따라 하중이 이동하며, 지붕의 하중과 차륜 하중을 전달하기

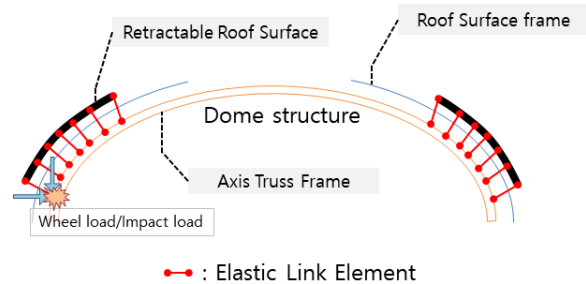


Fig. 5 Condition of elastic link element joint

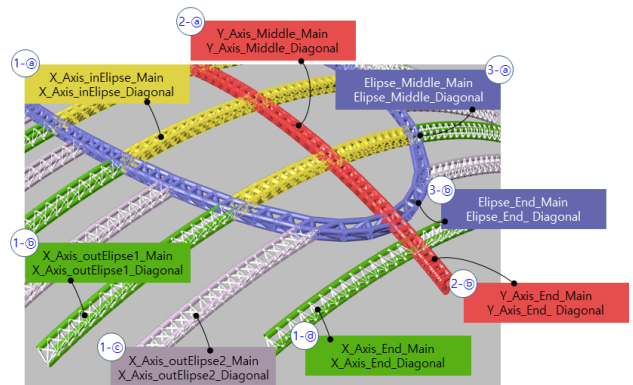


Fig. 6 Sorting of arch truss structures

위해 링크요소를 이용하여 연결부재 자동생성 기능 등이 들어 있다.

또한, 실제로 지붕의 개폐부(Fig. 7의 ⑤)는 Fig. 5와 같이 지붕면을 지나서 축을 이루는 트러스 구조체에 직접 차륜하중을 전달하므로 자동으로 생성되는 여러 부재가 동시에 겹치지 않도록 주의해서 모델링하였다. Fig. 7은 풍하중이 할당되는 면적이 계산되는 지붕면의 부분모델이다.

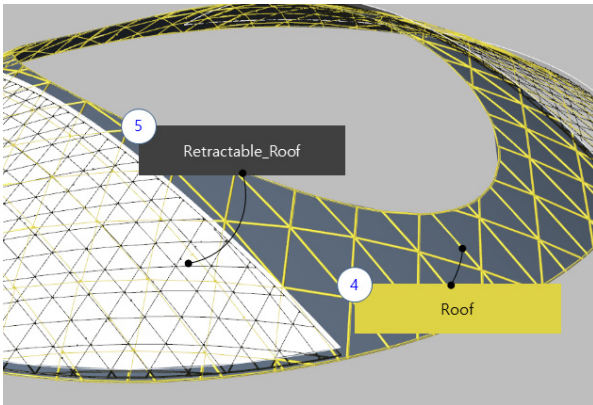


Fig. 7 Sorting of roof truss structures

2.3 개발 컴포넌트의 구성 및 기능

개발된 주요 컴포넌트 Wind Load Area, Wind Load Point, Wind Load Calculator는 아래와 같은 기능들을 포함하고 있다.

1) 개폐식 지붕의 입체트러스의 자동 모델링 및 동적해석 모듈 연계

2) 형상 및 조건에 따른 풍하중 자동생성

풍압계수 자동생성 컴포넌트(wind load area)는 축 방향에 따라 Fig. 2와 같이 돔 지붕에 대한 외압계수를 적용할 수 있도록 직경의 1/8, 2/8, 6/8지점에서 돔의 지붕면 형태를 A,B,C,D로 나누어 각각의 외압계수를 적용한다. 입력값에는 구조물의 풍압작용 면적, 풍하중을 적용할 방향으로 점의 좌표를 정렬한 값, 풍하중을 적용할 방향으로의 전체 구조물의 규모를 입력한다. 출력값으로는 입력값에서 받은 매쉬를 A, B, C, D 구역으로 나누어 출력한다. Wind Load Calculator Dome에는 밀폐형 건축물과 부분개방형 건축물을 구분하도록 하여 풍압계수를 달리하고 있으므로 이에 대한 설정이 가능하다.

개발된 컴포넌트 Wind Load Calculator Dome를 사용하기 위해서는 Wind Load Area가 함께 필요하다. Wind Load Area의 매커니즘은 다음과 같다.

우선 매쉬를 지정할 때, 들로네 삼각분할(delaunay triangulation)을 통해서 삼각형으로 곡면을 분할해 준다. 들로네 삼각분할은 삼각형을 정의하는 3개의 점을 제외한 어떤 다른

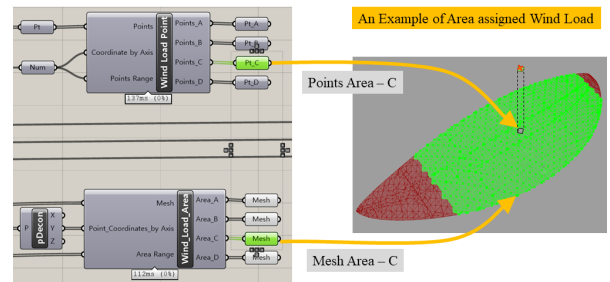


Fig. 8 Wind load point and wind load area

점도 삼각형의 외접원 이내에 포함되지 않아야 한다. 이 분할된 삼각형 매쉬를 보로노이 다이어그램(voronoi diagram)을 통해서 그 면의 중심점을 찾아 하중이 가해지는 작용점으로 지정한다. Mesh와 축 방향에 따른 구조체의 모든 점을 입력받아서 Wind Load Calculator 컴포넌트를 사용하기 위한 작용점과 해당매쉬를 생성해 준다(Fig. 8).

Fig. 9의 컴포넌트의 입력값은 아래와 같으며 이를 이용하여 풍압계수 PrA, PrB, PrC, PrD를 계산하여 출력한다. 구조물의 높이, 가로길이, 세로길이를 입력받아서 구조기준에서 규정하는 풍압계수를 계산한 후에 출력해 주면 이를 자동으로 모델에 있는 각 면적에 할당해 준다.

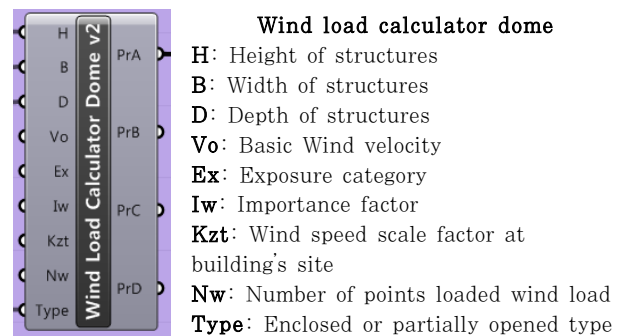


Fig. 9 Wind load calculator dome

2.4 재료의 성능 및 하중 조건과 하중 조합

2.4.1 재료의 성능

모델링에 사용된 강재는 주골조(main) SM490(SM325), 사재골조(diagonal) SS400(SS275)이며, 용접이음으로 공장 제작 트러스를 사용하였다고 가정하였다.

2.4.2 하중조건

고정하중은 지붕의 자중에 마감하중을 1kN/m²으로 고려하여 적용하였다. 활하중은 사람의 접근이 용이하지 않은 지붕구조 특성상 구조기준에서 사용하지 않는 지붕의 활하중 값으로 명시된 1kN/m²으로 적용하였다. 적설하중은 최소 지상적설하중

값인 0.5kN/m²으로 적용하였다(Jeong *et al.*, 2018). 적설 하중 및 풍하중의 경우에는 고정하중과 활하중과는 다르게 지붕 면이 개폐하면서 상단의 개폐면 형상이 변화하기 때문에 겹치는 지붕면적을 제외하도록 고려하였다.

2.5 예제모델의 요소 구현 및 해석

기본 형상모델링은 아래의 순서로 진행되었다. 형상을 모델링 한 후에 부분별로 그루핑하는 과정을 거치고 그루핑 된 부재마다 속성 정보 및 하중 조건을 입력하는 방식으로 모델링되어 있다.

1) 기초 형상 설정

Base Geometry는 기본 모델링 면(역삼각형 트러스의 하 현재면)이 되고, Offset Geometry는 트러스의 두께를 위해 중심으로부터 Offset한 면이 된다.

2) X축, Y축의 개수 설정

X축 아치는 개수를 늘릴 수 있도록 하였으며, Y축 아치는 현재 모델링에서는 1개이며, 이를 Keel Arch라고도 한다.

3) 링 트러스의 크기 설정

타원형 트러스 프레임을 만들고 이를 곡면에 투사하기 위한 알고리즘이다. 모델링은 좌우 대칭형이므로 반만 모델링하여 대칭복사하기 위해 Half Ellipse를 설정하였다.

4) 지붕트러스의 개구부 크기 설정

지붕에 타원형의 구멍을 뚫는 작업이다. 변화할 때 마다 타 원형으로 뚫린 크기를 표시하도록 하였다.

5) X축 부트러스 설정

아치의 개수를 늘릴때 마다 교대로 트러스가 건너가도록 생성된다. 링 트러스를 건너가는 트러스와 링 트러스에 의해 가로막혀지는 트러스로 나뉜다. 이를 메인아치와 서브아치로 구분하였다.

6) 개폐식 지붕 트러스 설정

개폐식 지붕을 구현하는 알고리즘이다. 모델링으로 보이기 위한 결과물(곡선있음)과 구조해석용으로 보여지는 용도의 결과물(곡선의 직선화)이 나뉘어 있다.

7) 지붕 트러스 설정

지붕면을 구현하는 알고리즘이다. 추후에 풍하중, 적설하중, 마감하중에 대한 면적산정에 쓰이게 된다.

8) 해석에 필요한 요소 모델링 및 원안 해석 수행

실제로 존재하지는 않으나 하중의 전달을 원활하게 만들기 위해 구조요소를 단순화하여 연결하는 연결요소를 모델링해야 한다.

9) 최적화 수행 및 해석결과

해석 수행 후 다시 Grasshopper상으로 가져온 모델링은 그 결과 값을 엑셀에 받아 저장하고 각 케이스별 데이터를 모으게 된다. 이렇게 모인 데이터는 손쉽게 그래프를 취합하여 그릴 수 있으므로 비교분석이 용이한 형태로 변형할 수 있다. 이 결과값에 따라 엔지니어는 가장 최적의 대안을 선정하기 위한 정보를 쉽게 얻을 수 있다.

2.6 파라미터 원안 설정 및 최적화 수행 결과

원안의 부재 크기 설정을 위해 자료를 수집하였으나 정확한 수치가 명시된 자료가 없어 밝혀진 자료 중 사용된 철골량을 토대로 참고자료를 통해 원안을 설정하였다.

Table 3 O dome structural analysis results

Original design plan	Opening and closing rate		
	0% (totally opened)	50% (half-opened)	100% (closed)
Quantity of steel(ton)	12,645		
Quantity of steel for Retractable roof(ton)	1,975		
Max displacement length(m)	0.508	0.427	0.302
Max P-M-M Ratio	0.963	0.942	0.953

Table 3과 같이 생성된 원안의 철골 물량은 12,645ton이며, 상용구조해석프로그램을 통해 구조물 부재 전체 중 최대 처짐이 일어나는 부재의 처짐길이를 얻어 내었고, 전체 부재의 응력비를 검토하였다. 이 후 현재 생성된 원안을 통해 파라미터를 변화시키지 않은 채 구조부재 단면성능의 최적화를 수행하고, 원안 대비 최대 처짐과 물량을 비교해 보았다.

먼저 구조해석 모델의 응력검토 및 처짐 결과값과 물량을 검토하여 최소의 비용으로 가장 효율적인 구조성능을 얻기 위해 각 부재의 그룹 간의 요소에 사용한 재료 및 단면을 파라미터로 설정하여 대안을 생성해 내고 이에 대한 결과를 정리하여 최적안을 도출하였다.

이 후에 원안의 부재그룹에서 추가로 그룹들을 세분화 하여 최적화한 결과, 원안 물량의 경우에서 부재의 개수를 변경하지 않고 단면 조건을 변경하면서 최적의 구조성능을 발휘하는 단면을 통해 물량을 검토해 보았다.

분류 중 그룹의 명명법은 다음과 같다. 첫 번째 알파벳은 E (ellipse), R(retractable parts), X_Axis, Y_Axis로 나뉜다. 두 번째 분류는 E(end), M(middle), inE(inner parts of Ellipse), outE(outer parts of Ellipse)로 나뉜다. D (diagonal), M(main)은 사재와 상하현재를 뜻한다. 알파벳 분류 중 마지막에 붙은 L(lower)은 하단 사재 트러스, U (upper)는 상단 사재 트러스이며, D 뒤에 세분화를 위해 U, L이 붙는다. 이는 원안의 그룹에서 더 세분화 한 것이다. 원안일 때의 물량과 부재그룹 별 최대 PMM ratio는 Table 4와 같다. PMM ratio는 부재가 축력, 전단력, 모멘트력의 조합으로 견딜 수 있는 응력의 비율을 나타낸다. 본문에는 그 중 최대값이 나타나는 하중조합을 표기했다. 부재응력이 남는 그룹을 세분화하여 도출된 최종 최적값은 다음의 Table 5와 같다.

Table 4 Original group's PMM ratio according to volume and switching ratio of major steps

Original design group	Original volumn (ton)	$PMMRatio _{max}$ by groups
E_E_D	47.45	0.61
E_E_M	101.36	0.55
E_M_D	111.01	0.62
E_M_D+M	90.53	0.80
E_M_M	414.26	0.92
R_Roof	1975.00	(1.89)
Roof	5283.98	0.93
X_Axis_E_D	518.68	0.29
X_Axis_E_M	191.44	0.55
X_Axis_inE_D	458.63	0.73
X_Axis_inE_M	831.24	0.32
X_Axis_LoadDeli	97.74	0.95
X_Axis_outE_D	1042.72	0.60
X_Axis_outE_M1	624.92	0.93
X_Axis_outE_M2	735.22	0.64
Y_Axis_E_D	35.46	0.69
Y_Axis_E_M	77.82	0.82
Y_Axis_M_D	114.38	0.96
Y_Axis_M_D+M	72.99	0.46
Y_Axis_M_M	339.70	0.70
Gross quantity	12,645.85	-

원안의 철골량 12,645ton으로부터 최적화 과정을 거쳐 약 1,229ton을 절감하여 11,416ton의 물량으로 구성이 가능하였으며, 이에 대한 전체 부재 중 최대 처짐길이는 원안의 최대 처짐길이보다 약 3cm 줄어 들었다.

해석대안은 각각의 부재 그룹별 단면 5종을 교차하며 1,250번의 해석결과를 통해 도출했으며, 1개 케이스 해석 당 약 2~3분의 시간이 소요되었다. 위와 같은 결과는 추가로 부재 그룹을 세분화하여 더 많은 대안을 자동으로 평가할 수 있는

Table 5 Optimized PMM ratio according to volume and switching ratio of major steps

Original design group	Optimized design	Quantity optimum (ton)	Compared to original plan (ton)	$PMMRatio _{max}$ by groups
E_E_D	E_E_D	47.45	-	0.84
E_E_M	E_E_M	92.6	-8.76	0.76
E_M_D	E_M_D	111.01	-	0.81
E_M_D+M	E_M_D+M	135.94	-45.41	0.90
E_M_M	E_M_M	369.78	-44.48	0.99
R_Roof	R_Roof	1975.00	-	(2.25)
Roof	Roof	4514.61	-769.37	0.98
X_Axis_E_D	X_Axis_E_D_L	73.23	-405.45	0.65
	X_Axis_E_D_U	40.00		0.98
X_Axis_E_M	X_Axis_E_M	191.44	-	0.56
X_Axis_inE_D	X_Axis_inE_D_L	192.98	-246.98	0.71
	X_Axis_inE_D_U	18.67		0.88
X_Axis_inE_M	X_Axis_inE_M	831.24	-	0.45
X_Axis_LoadDeli	X_Axis_LoadDeli	268.40	+170.6	0.98
X_Axis_outE_D	X_Axis_outE_D1_L	207.78	-405.45	0.67
	X_Axis_outE_D1_U	54.44		0.87
	X_Axis_outE_D2_L	254.91		0.89
	X_Axis_outE_D2_U	6.91		0.72
X_Axis_outE_M1	X_Axis_outE_M1	922.51	+297.6	0.95
X_Axis_outE_M2	X_Axis_outE_M2	710.35	-24.87	0.80
Y_Axis_E_D	Y_Axis_E_D	35.46	-	0.97
Y_Axis_E_M	Y_Axis_E_M	72.01	-5.81	0.86
Y_Axis_M_D	Y_Axis_M_D	114.38	-	0.95
Y_Axis_M_D+M	Y_Axis_M_D+M	67.46	-5.53	0.60
Y_Axis_M_M	Y_Axis_M_M	108.16	-231.54	0.93
Gross quantity		11416.7	-1229.9	-

프로세스에 의해 원안보다 더 효율적인 대안을 찾아낼 수 있었기 때문에 물량은 줄이면서 구조성능은 더욱 확보하였음을 알 수 있다.

3. 결 론

파라메트릭 설계에 필요한 전산도구 및 설계의 개념의 설명에서부터 시작하여, 선행연구에 의해 개발된 건축구조물의 파라메트릭 모델링 및 최적화설계를 가능하게 한 StrAuto를 소개하고, 개폐식 대공간 건축물에 특화된 모델러 RSAuto의 기능을 추가하고 개선하여 구조시스템이 풍하중 및 동적하중에 따라 다양한 대안을 창출해 내고 자동으로 구조해석에 대한 결과값을 얻어오는 기능을 새로 탑재하여 RSDynamic을 개발하게 되었다.

본 논문에서는 직접 사람이 모델링하기에 수 시간이상이 걸리는 풍하중을 자동으로 할당하는 과정을 보여주고 사용자가 단 시간에 수많은 대안의 데이터를 획득할 수 있는 프로세스를 개발하고 진행하였다. 이 과정을 이용하면 숙련된 엔지니어가 손쉽게 대안을 비교하고 결정할 수 있다. 구조기준에는 규정되지 않은 형상의 풍하중 할당 프로세스이나 앞으로 본 연구와 같은 데이터의 축적에 의해 기준이 상세해질 것으로 기대된다.

개발한 RSDynamic을 이용하여 돔 지붕형 슬라이딩 개폐시스템인 예제 모델을 구현해 보았다. 개폐식 지붕 구조시스템의 모델링을 설정된 파라미터들의 변경만으로 구조해석까지 가능하게 되어 구조해석 수행에 걸리는 시간을 단축할 수 있었다. 실제로 하중벡터를 일일이 상용구조해석프로그램 상에서 기술자가 모델링하고 해석하려면 직접 모델링하는 수고와 시간이 많이 들고, 안전성 검토, 오류 등의 문제를 발견할 시 수정하는 시간이 많이 들게 된다. 이러한 수고를 RSDynamic을 통해 덜어낼 수 있으며, 빠른 대안창출을 통해 더욱 효율적인 설계안을 도출할 수 있다. 추후 연구로 CFD해석을 이용하여 개폐식 대공간 지붕면의 풍압분포도를 통해 구조설계기준(KBC2016)에 따라 적용된 계수를 비교, 분석해 볼 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비 지원

(19AUDP-B100343-05)에 의해 수행되었습니다.

References

- Blaise, N., Grillaud, G., De Ville de Goyet, V., Denöel, V. (2011) Application of Deterministic and Stochastic Analysis to Calculate a Stadium with Pressure Measurements in Wind Tunnel, *8th International Conference on Structural Dynamics EUROLYN*.
- Blaise, N., Denöel, V. (2013) Principal Static Wind Loads, *J. Wind Eng. & Ind. Aerodyn.*, 113, pp.29~39.
- Choi, H.C. (2014) The Parametric Structural Optimization with StrAuto, *Rev. Archit. & Build. Sci.*, 58(2), pp.50~54.
- Ha, Y.C. (2016) [Special Feature] Revised Wind Loads in KBC2016, *Archit. Inst. Korea*, 60(9), pp.31~37.
- Jeong, J.Y., Kim, C.K., Joung, B.R., Lee, S.E., Kim, S.U. (2018) Design and Implementation of Parametric Modeler for Retractable Roof Three-Dimensional Truss, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 31, pp.1~8.
- Kang, J.W., Kim, G.C., Kim, H.S., Seok, K.Y. (2014) The Present and Future of Retractable Roof Structures, *J. Korean Assoc. & Spat. Struct.*, 14(3), pp.24~31.
- Kim, Y.M., Kim, C.K., Choi, H.C. (2012) Selection of Optimal Structural System for Complex-shaped Super-tall Building Structural Systems Using Parametric Design Technique, *J. Archit. Inst. Korea Struct. & Constr.*, 28(1), pp.77~84.

요 지

본 연구의 목적은 개폐식 대공간 구조물의 풍하중 산정 및 구조해석의 과정을 자동으로 수행하는 컴포넌트를 개발하는 것이다. 설계한 파라메트릭 모델링을 StrAuto를 통해 구조해석 자동화단계를 거쳐 구조해석용 모델로 변환하는 과정을 실시간으로 연동하여 구조해석 결과를 자동으로 도출하는 과정으로부터 본 연구에서는 추가로 구조물의 풍하중을 형상에 따라 상세히 할당하는 기능을 개발하였다. 이와 같은 과정을 통해 풍하중에 대한 최적화를 수행하여, 기존 설계된 구조의 물량을 줄이고, 구조적 안정성은 유지하는 방향으로 결론을 도출하였다. 추후에는 본 예제 모델을 통해 진동제어 최적화를 위한 제진 장치 설치위치의 자동탐색이 가능하게 되는 연구를 진행할 계획이다.

핵심용어 : 개폐식 대공간 구조물, 풍하중, 파라메트릭 모델링, StrAuto, 구조해석 자동화