대공간 건축물 골조물량 최적화를 위한 파라메트릭 설계 프로세스

최 현 철¹ · 이 시 은² · 김 치 경^{3*}

¹가천대학교 건축학과, ²백석대학교 정보통신학부, ³단국대학교 건축공학과

Parametric Design Process for Structural Quantity Optimization of Spatial Building Structures

Hyunchul Choi¹, Si Eun Lee² and Chee Kyeong Kim^{3*}

¹Dept. of Architecture, Gachon Univ., Seongnam, 13120, Korea

²Division of Information & Communication Baekseok Univ., Cheonan, 31065, Korea

³Dept. of Architectural Engineering, Dankook Univ., Yongin, 31116, Korea

Abstract

In this paper, it is covered in detail the process of generating structural alternatives with geometry change and its optimization by StrAuto. The main roof structure of the Exhibition Center is modelled parametrically and the optimal alt is derived by observing volume changes according to geometry change of main roof truss. Existing studies performed optimization process through sections and properties due to the limitations of shape change, but this study have meaning of performing the optimization with geometry changes which is the most critical skills of StrAuto. By the process of securing a sufficient margin by geometry changes and reducing volume with the optimization of sections, despite of a partial optimization of large space structure, it could be reduced by 11.7% of the total volume.

Keywords : StrAuto, geometry changes, structure optimization, spatial structure, parametric model

1. 서 론

파라메트릭 구조해석 및 최적화 도구로 개발된 StrAuto는 파라미터의 변경을 통해 수많은 구조대안을 생성하여 해석 결과를 비교하고, 이를 통해 구조성능을 최적화하여 물량을 최소화할 수 있는 파라메트릭 구조해석 인터페이스이다. 단면의 종류 및 두께와 이들의 조합, 강도 등 재료의 물성과 이들의 조합 등, StrAuto를 통하여 여러 가지 구조적 속성을 변경하면서 최적안을 찾아낼 수 있다. 그러나 파라메트릭 구조해석 인터페이스인 StrAuto가 지니는 또다른 장점은 바로 형상 변경을 통한 최적화가 가능하다는 것이다.

기존의 구조해석 도구들은 형상이 정해진 상황에서 여러 가지 구조적 속성을 엔지니어의 직관에 따라 변경하면서 최적안을 찾아낼 수 있는 것이 대부분이다. 여기에 적당한 매크로나

플러그인 등을 적용하여 여러 가지 속성을 특정 범위 안에서 변경하면서 조금 더 많은 대안을 탐색하는 정도였다. 지금까지 StrAuto를 적용한 사례들도 구조적 속성에 대한 폭넓은 변경과 이에 대한 최적화가 주를 이루었다. 초고층 건물의 중앙코어 벽체의 두께와 강도를 최적화하거나(Choi *et al.*, 2014), 초고층 건물의 기둥의 조닝 계획을 최적화하거나(Lee *et al.*, 2014), 초고층 건물의 아웃리거 설치 위치를 최적화하는(Kim *et al.*, 2012) 연구들이었다.

하지만, Rhino와 Grasshopper 기반의 StrAuto는 구조 형상 자체도 파라메트릭 디자인을 적용하여 풀어내기 때문에, 구조 형상을 변경하면서 최적화를 수행할 수 있다는 것이 가장 큰 장점이다(Kim *et al.*, 2012). 구조 형상을 변경하는 최적화는 구조적 속성을 변경하는 것과는 비교할 수 없을 정도로 물량을 절감할 수 있다. 구조적 속성을 변경하는 최적화는

* Corresponding author:

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

Received September 28 2016; Revised December 5 2016;

Accepted January 6 2017

© 2017 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.

허용능력 한계치 안에서 여유 있는 부분의 물량을 줄여나가는 것이지만, 구조 형상을 변경하는 최적화는 그 한계를 충분히 늘리는 것이 가능하기 때문이다.

본 논문에서는 StrAuto를 이용하여 구조물의 형상 변경을 통한 대안을 생성하고, 이에 대한 최적화를 수행하는 과정을 상세하게 다루고자 한다. StrAuto의 적용 대상은 비정형 트러스 지붕을 포함한 대공간 전시장 구조물로, 입찰도서를 바탕으로 전체 형상을 파라메트릭하게 디자인하고, 가장 폭이 넓은 경간의 구조 형상을 변경하면서 임계치 내에서 물량 변화를 관측하여 최적안을 도출하였다. 논문에서는 StrAuto를 적용하는 과정의 세부적인 사항들을 검토하여, StrAuto를 활용한 형상 변경 최적화 프로세스를 구축하고자 한다.

2. StrAuto를 통한 구조형상 최적화

2.1 StrAuto의 최적화 과정

Grasshopper를 기반으로 개발된 StrAuto는 파라메트릭 디자인 도구처럼 매개변수들을 사용하여 논리적인 관계를 정의하고, 이를 통해 형상 및 모델을 제어하는 동적이고 규칙에 기반한(rule-based) 도구이다. 즉, 고정된 좌표나 수치를 사용하기보다는 변수를 통해 설계의 규칙과 논리 관계를 정의하기 때문에 기하학적으로 유연한 수많은 형상 대안들을 쉽게 생성할 수 있다.

StrAuto는 구조시스템을 최적화하기 위해 수많은 구조 시스템의 대안을 자동으로 생성하고 그 성능을 평가함으로써 가장 우수한 설계안을 채택하는 전산설계(computational design) 기술이다. StrAuto를 통한 파라메트릭 골조 모델러 및 최적설계시스템은 파라메트릭 기법에 의해 구조해석 모델들을 자동 생성하고, 구조체 형상을 제어하는 매개변수들을 관리하면서 해석모델을 변환해 외부의 구조해석 솔버로 보내고 그 해석결과를 실시간 피드백 받아 평가한다. 그리고 평가된 해석결과가 특정 목표치(최적값)에 도달할 때까지 새로운 파라미터 조합을 생성함으로써 해석모델을 진화시킨다.

Fig. 1은 StrAuto의 최적화 과정을 나타낸 모식도이다. 형상 모델을 파라메트릭하게 변경 가능하도록 만들고, 여기에 구조적 속성을 적용한 구조해석 모델을 만든다. 구조해석 모델은 StrAuto가 제어하는 상용 구조해석 솔버에 전송되고, 실시간 해석을 거친다. 전송받은 해석 결과를 평가하고, 이를 바탕으로 새로운 모델을 위한 파라미터를 설정한다. 그리고 새로운 파라미터는 새로운 형상 모델과 구조해석 모델을 만들어 이 과정을 반복한다. 이 전과정이 사용자가 설정한 범위에서 자동으로 반복해서 이루어지기 때문에 수많은 대안을 검토하면서 사용

Fig. 1 Iterative optimization process of StrAuto

자가 원하는 방향으로 최적화를 수행할 수 있다.

StrAuto는 구조해석을 위해 SAP2000, ETABS 등의 상용 구조해석 솔버와 연동하여 해석을 제어한다. 파라메트릭 모델링 컴포넌트를 통하여 구조체 형상, 부재 단면형상, 치수를 매개 변수(parameter)로 수많은 해석모델 대안을 자동으로 생성하고, 솔버 컨트롤 컴포넌트를 통해 연동된 구조해석 패키지로 구조 해석을 수행하여 그 결과를 실시간 추출함으로써 유전자 알고리즘(genetic algorithm), 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing)에 기반한 자동 최적화를 수행한다. 특정 범위에 대한 세부적인 조사를 하거나 전체적인 경향을 파악하기 위해서 파라미터 조합을 사전에 만들어 전수조사를 할 수도 있다. 이 경우 중요한 판단을 위한 근거 자료를 폭넓게 생성할 수 있는 장점이 있다.

StrAuto의 핵심기능은 자동 생성된 형상 모델과 해석 솔버의 반복적 데이터 교환에 있다. 해석 솔버로부터 피드백 받은 결과를 비교 검토함으로써 형상 모델을 진화시키고, 끊임없는 반복 해석을 수행함으로써 최적해에 근접해가는 것이다. 이러한 기능 덕분에 비정형 구조물을 파라메트릭 모델로 만들어 수많은 대안을 빠른 시간 안에 생성, 해석, 비교 검토함으로써 최적의 구조시스템 대안을 찾아낼 수 있다.

2.2 최적화를 위한 파라메트릭 모델

StrAuto를 통하여 구조물을 최적화하기 위해서는 엔지니어가 원하는 방향으로 변경될 수 있는 파라메트릭 모델을 작성하는 것이 필요하다. 아웃리거의 높이를 변경하거나, 구조물의 층수나 층고를 변경하거나, 특정 구조 시스템을 넣고 빼거나, 트러스의 부재 수를 조정하는 등의 형상 변경을 위해서는 해당하는 부분이 파라미터에 의해 변경될 수 있도록 모델링을 해야 한다. Fig. 2는 파라미터에 의해 형상이나 구조 부재의 변경이 이루어지는 사례를 보여주고 있다.

구조적인 속성도 마찬가지다. 각 부재에 설정하는 단면의 종류나 크기, 재료 등에 대한 대안들을 파라미터에 따라 조절할

Fig. 2 Geometry alternatives with parameter change

수 있도록 파라메트릭 구조해석 모델을 작성해야 한다. 형상 변경은 변경 여부를 쉽게 확인할 수 있지만, 구조적인 속성은 설정을 잘못했다고 하더라도 해석을 수행하여 이상한 결과가 나오기 전에는 실수를 찾아내기가 어렵다. 그러므로 구조물의 올바른 최적화를 위해서는 정확하게 구조 속성을 설정할 수 있도록 신경써야 한다. 이를 위하여 구조 속성을 색이나 텍스트 등으로 모델에 직접 표시하는 것이 바람직하다. Fig. 3은 초고층 건물의 코어 벽체의 부재와 강도를 알아보기 쉽게 색으로 구분하여 모델에 직접 표시한 사례이다.

Fig. 3 Color display of structural properties

본 연구의 대상인 비정형 대공간 전시장 구조물도 형상과 속성을 변경할 수 있도록 전체 구조물을 파라메트릭 모델로

작성하였다. Fig. 4는 전시장 지붕 구조물의 파라메트릭 모델로, 모델이 제대로 작성되었는지 쉽게 확인할 수 있도록 Rhino의 각 레이어의 이름을 부재 종류로 설정하고 레이어의 색도 모두 다르게 지정하였다.

Fig. 4 Parametric model of the exhibition center

Fig. 5는 주요 트러스들을 만들어내는 파라메트릭 모델의 정의이다. 작은 상자처럼 보이는 컴포넌트들이 고유의 기능을 수행하고, 각 기능들을 선으로 연결하여 전체 파라메트릭 모델을 완성한다. 연관된 기능은 그룹으로 묶어 색으로 구분하였고, 큰 그룹들은 기준점에서 형상을 정의하고, 단면의 종류에 따라 분류하여 구조적인 속성을 부여하고, 모델을 쉽게 수정할 수 있도록 일목요연하게 작성하였다.

Fig. 5 Grasshopper/StrAuto definition for trusses

Fig. 6은 지붕 구조물의 메인 트러스에 단면을 설정하는 부분으로, 선형 부재에 구조적인 속성을 부여하고 있다. 부재별로 파라미터를 이용한 단면을 설정할 수 있게 작성하였다.

Fig. 6 Definition for main truss elements

3. 구조형상 최적화 모델 설정

3.1 비정형 대공간 전시장 구조물의 메인트러스 분석

Fig. 7 Main structure of the exhibition center

대상 구조물은 세 개의 이웃한 지붕으로 이루어진 대형 전시 공간이다(Fig. 7). 그 중에서도 가장 넓고 긴 가운데 지붕을 MTR(Main Truss Roof)로 이름지었다. MTR은 양쪽 끝의 작은 트러스가 지지하는 부분을 제외하고 가장 큰 트러스가 받치는 부분의 길이만 210m로, 12개의 입체형 메인 트러스가 2개씩 한 조를 이루어 72m의 경간을 받치고 있다.

Fig. 8 Top chord framing plan of main truss roof

Fig. 8에서 보는 것처럼 한 조의 트러스 사이의 간격이 30m가 되도록 벌어져 있으며, 12개의 각각의 입체트러스 사이의 간격은 15m가 된다. 평면에서 보듯이 지지점에서보다 트러스 가운데로 갈수록 트러스의 폭이 넓어지고 있으며, 12개의 트러스가 모두 같은 폭으로 벌어지는 것처럼 보인다. (지지점에서는 상현재 길이가 2.0m이고, 트러스 가운데 상현재는 4.0m이다. 지지점에서는 단면이 삼각형이고, 트러스 가운데에서는 역사다리꼴이며, 하현재의 폭은 2.0m이다.)

Fig. 9 Perspective of a couple of main truss(MTR1)

실제로 도면에서도 12개의 입체트러스를 모두 MTR1로 지칭하고 있으며, Fig. 9와 같이 하나의 투시도로만 나타내고 있다. 그러나 12개 트러스의 위치에 따라 지붕 형상이 다르기 때문에 모든 트러스의 형상이 다 같을 수가 없다. 즉, 평면도 상에서는 변화가 똑같이 나타나는 것처럼 보이지만, 실제로 지붕면의 높이와 곡률을 맞추려면 모든 형상이 다 달라지는 것이다. Fig. 10에서 지붕면의 곡선과 각 트러스의 위치에 따라 높이와 형상이 달라지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10 Longitudinal section of main roof

Fig. 11은 MTR1의 입면도이다. 트러스는 균일하게 3.0m 간격으로 끊어져있으며, 길이 방향으로 3.0m가 아니라 평면 상에서 봤을 때, 즉 수평 거리가 3.0m 간격으로 되어 있다. 따라서 각 트러스 부재의 길이는 서로 다르다. 트러스의 춤은 2.0m로 되어 있는데 수직 부재의 길이가 2.0m가 아니라, 상현재가 이루는 곡선과 하현재가 이루는 곡선의 오프셋 거리가 2.0m이다. 그래서 마찬가지로 수직 부재와 대각선 부재의 길이도 모두 다르다. 그리고 트러스의 하부는 지름 100mm의 로드가 지지하고 있다.

Fig. 11 Elevation of main truss(MTR1)

3.2 메인트러스의 파라미터 설정

앞장에서 살펴본 것처럼 MTR의 구조설계는 지붕의 곡률이나 입체적인 상황을 고려하거나, 부재의 길이 등에 대한 고려없이 초기 설계 단계에서 발전을 시키지 않은 것으로 보인다. 즉, 평면상에서의 3.0m 간격의 부재 이음은 상부 펠런이나 지붕 덮음에 대한 고려없이 평면으로만 설계를 한 결과이며, 트러스의 춤도 모든 구간에서, 그것도 수직 방향의 길이가 아닌 오프셋 거리가 2.0m인 것은 지붕면의 곡선을 2.0m 오프셋한 결과이다. 결국 모든 트러스 연결점은 지붕면의 곡선과 2.0m를 아래로 오프셋한 곡선을 수평 방향으로 3.0m 간격으로 끊어서 생긴 교점들에 지나지 않는다.

Fig. 12 Section of exhibition hall covered with MTR

Fig. 12에서 이와 같은 문제를 쉽게 확인할 수 있다. 가장 넓은 지붕을 받치는 트러스임에도 상대적으로 왜소하게 보이며, 모든 점에서 폭이 똑같은 현상이 나타난다. 이런 점을 보강하기 위해 트러스 하부를 로드로 연결하여 심리적인 안정감과 구조적 문제를 해결한 것으로 보인다. 연구진은 트러스 하부 로드로 연결된 구간은 실제로 전시장으로 사용할 수 없는 공간임에 주목하였다. 그 아래로 전시장을 분할할 때 사용하는 파티션들이 매달려 있기 때문에, 트러스 하부에 로드로 연결된 공간은 특별한 다른 용도가 없는 구조 최적화를 위한 공간으로 활용하기에 적합한 공간으로 판단하였다.

우선, 지지점을 변경하는 것은 다른 공간의 활용이나 건축 및 다른 설계에 영향을 미치므로, 지지점을 고정한 채로 트러스의 춤을 변화시키는 것으로 형상 변경의 포인트를 잡았다. MTR1 트러스는 지지점에서는 단면이 삼각형이고, 가운데 부분에서는 단면이 역 사다리꼴 모양이 된다. 그러면서 상현재

기준으로 폭도 2.0m에서 4.0m로 벌어져서 가운데 부분에서는 춤보다 옆으로 상당히 넓은 사다리꼴 모양이 된다. 연구진이 착안한 것은 가운데로 갈수록 트러스의 폭이 넓어진 것처럼 트러스의 춤도 더 깊어지게 만들어서 최적화를 수행하는 것이다. 즉, 트러스의 모든 구간의 춤(정확하게는 오프셋 거리)이 2.0m가 되는 원안에서, 지지점에서는 2.0m를 유지하면서 점진적으로 춤이 깊어져서 가운데 부분에서 원하는 만큼의 길이로 춤이 깊어지게 만드는 것이다.

Fig. 13 Gradual change of truss geometry(MTR1)

연구진은 비정형 대공간 전시장 구조물 지붕 구조 전체를 StrAuto를 적용하여 파라메트릭 모델로 만들었으며, 설계 의도를 분석하여 얻어낸 파라미터로 MTR을 모델링하였기 때문에, 가운데 지점의 높이를 조정하여 12개 트러스 전체의 높이가 점진적으로 변하도록 수정할 수 있었다. Fig. 13에서 보는 것처럼 지지점은 그대로이며, 전체적인 트러스의 형상인 상현재는 그대로 유지한 채로 하현재의 높이를 점진적으로 변화시켜 트러스의 춤이 지붕 가운데로 갈수록 깊어지게 하였다. Fig. 13은 가운데 부분이 2.0m에서 3.6m로 변화된 그림을 나타낸 것이다.

4. StrAuto를 적용한 메인 트러스의 최적화 과정

4.1 형상변경에 따른 변위와 물량변화 검토

앞 장에서 살펴본 것처럼 MTR 지붕 구조물의 메인 트러스는 모든 위치에서 춤이 2.0m로 동일하다. 파라메트릭 모델을 이용하여 가운데 부분의 춤을 2.0m에서 4.0m까지 변화시키면서 변위와 물량을 측정하였다. Table 1은 춤의 변화에 따른 변위와 물량의 변화를 정리한 것이다. Total Quantity는 Main Truss Roof 구조물 전체의 물량변화를 나타낸 것이고, Subject Quantity는 최적화할 대상 부재들만의 물량변화를 나타낸 것이다. 원안(2.0m)에서는 대상 부재들의 물량(약 1,065,000kg)이 구조물 전체의 물량(2,987,000kg)의 약 35.7% 정도가 된다. 단면 최적화를 시행하기 전에 춤이 깊어

Table 1 Deflection of main truss roof with depth change

Depth (m)	Deflection (m)	Total qty (kg)	Subject qty (kg)
2.0	-0.104870	2,986,757	1,064,978
2.1	-0.103929	2,988,343	1,066,564
2.2	-0.103032	2,989,962	1,068,183
2.3	-0.102174	2,991,612	1,069,834
2.4	-0.101351	2,993,294	1,071,515
2.5	-0.100559	2,995,004	1,073,225
2.6	-0.099794	2,996,741	1,074,963
2.7	-0.099054	2,998,506	1,076,727
2.8	-0.098336	3,000,295	1,078,517
2.9	-0.097638	3,002,109	1,080,331
3.0	-0.096959	3,003,947	1,082,168
3.1	-0.096296	3,005,806	1,084,028
3.2	-0.095648	3,007,688	1,085,910
3.3	-0.095015	3,009,590	1,087,812
3.4	-0.094394	3,011,513	1,089,734
3.5	-0.093786	3,013,454	1,091,676
3.6	-0.093188	3,015,415	1,093,636
3.7	-0.092602	3,017,393	1,095,615
3.8	-0.092025	3,019,389	1,097,610
3.9	-0.091458	3,021,401	1,099,623
4.0	-0.090900	3,023,430	1,101,652

지면서 수직부재들이 길어지기 때문에 표에서 물량이 서서히 증가하는 것을 알 수 있다. 춤의 깊이가 4.0m일 때, 원안(2.0m)보다 전체 물량에서는 1.2%, 대상 부재들의 물량에서는 3.4% 정도 증가하였다.

그런데, 약 3.4% 정도의 물량 증가에 비해서 변위는 104.9mm에서, 90.9mm로 약 13.3%가 감소하였다. 형상변경으로

Fig. 14 Change of truss geometry(Depth 2.0 > 3.6)

Fig. 15 Perspective of truss geometry change

트러스의 구조적 성능이 좋아지면서 단면 최적화를 위한 여유를 충분히 확보하였다. 이후 수행되는 단계에는 각각의 춤에서 생긴 여유변위 만큼 단면을 조절하면서 물량을 최소화할 것이다.

Fig. 14는 춤의 깊이가 2.0m에서 3.6m로 변경되었을 때, 트러스의 모양이 입면에서 어떻게 달라지는지를 보여준다. 지지점은 그대로 유지되면서 가운데로 갈수록 조금씩 춤의 깊이가 늘어나는 것을 볼 수 있다. Fig. 15는 같은 형상 변화를 아래쪽에서 바라본 투시도이다.

4.2 형상 및 단면변경에 따른 변위와 물량 변화 검토

단면은 몇 차례의 실험 테스트를 통해 엔지니어의 감수를 받아 5개의 세트로 진행하였다. Table 2는 단면 조합의 세부 내용을 정리한 것이고, 각 단면 조합은 가장 두꺼운 부재의 두께를 기준으로 이름지었다. 단면의 직경을 바꾸는 것은 상부 지붕의 연결부재 및 지지점 등의 연결부재 설계에 영향을 주기 때문에 단면의 두께만 바꾸는 것으로 조정하였다. 가장 두꺼운 부재는 두께가 20mm에서 6mm까지 바뀌고, 가장 얇은 부재는 두께가 10mm에서 3mm까지 바뀐다.

Table 3은 트러스 춤의 깊이 별로 단면 변화에 따른 변위의 변화를 나타낸 것이다. 음영으로 표시한 부분은 구조물의 최대 변위가 원안의 최대 변위인 104.9mm보다 큰 대안들이다. 춤의 깊이를 늘려 확보한 여유보다 단면을 더 많이 줄였기 때문에 최종 선택에서 제외할 대안들이다.(A8 SET와 A6 SET는 모든 높이에서 제외되기 때문에 본 논문의 표에 결과를 실지 않았다.) 경계선에 있는 대안인 춤이 3.6m일 때 단면 조합을 A12 SET로

Table 2 Profile list of section alternatives

Original	A16 SET	A12 SET	A10 SET	A8 SET	A6 SET
CHS Ø355mm 20mm(T)	CHS Ø355mm 16mm(T)	CHS Ø355mm 12mm(T)	CHS Ø355mm 10mm(T)	CHS Ø355mm 8mm(T)	CHS Ø355mm 6mm(T)
CHS Ø355mm 16mm(T)	CHS Ø355mm 12mm(T)	CHS Ø355mm 10mm(T)	CHS Ø355mm 8mm(T)	CHS Ø355mm 6mm(T)	CHS Ø355mm 5mm(T)
CHS Ø244mm 20mm(T)	CHS Ø244mm 16mm(T)	CHS Ø244mm 12mm(T)	CHS Ø244mm 10mm(T)	CHS Ø244mm 8mm(T)	CHS Ø244mm 6mm(T)
CHS Ø168mm 12.5mm(T)	CHS Ø168mm 10mm(T)	CHS Ø168mm 8mm(T)	CHS Ø168mm 6mm(T)	CHS Ø168mm 5mm(T)	CHS Ø168mm 4mm(T)
CHS Ø168mm 10mm(T)	CHS Ø168mm 8mm(T)	CHS Ø168mm 6mm(T)	CHS Ø168mm 5mm(T)	CHS Ø168mm 4mm(T)	CHS Ø168mm 3mm(T)

Table 3 Deflection of mtr with alternative sections(m)

Depth	Original	A16 SET	A12 SET	A10 SET
3.0	-0.096959	-0.102274	-0.108507	-0.114636
3.1	-0.096296	-0.101598	-0.107845	-0.113958
3.2	-0.095648	-0.100938	-0.107201	-0.113300
3.3	-0.095015	-0.100294	-0.106572	-0.112659
3.4	-0.094394	-0.099665	-0.105957	-0.112034
3.5	-0.093786	-0.099049	-0.105355	-0.111424
3.6	-0.093188	-0.098444	-0.104765	-0.110827
3.7	-0.092602	-0.097851	-0.104185	-0.110242
3.8	-0.092025	-0.097269	-0.103615	-0.109667
3.9	-0.091458	-0.096696	-0.103054	-0.109103
4.0	-0.090900	-0.096133	-0.102501	-0.108547

적용한 대안은 최대 변위가 약 104.8mm로 원안의 최대 변위에 근접(99.9%)한다.

Table 4는 트러스 춤의 깊이와 단면 변화에 따른 MTR 지붕 구조물 전체의 물량 변화를 나타낸 것이다. 춤의 깊이가 3.6m 일 때 단면 조합 A12 SET인 대안의 구조물 전체 물량이 약 2,637톤으로 원안의 구조물 전체 물량인 2,987톤에 비해 약 11.7% 감소하였다. 단면의 변화없이 춤의 깊이를 3.6m로 형상

Table 4 Total quantity of mtr with alternatives(Kg)

Depth	Original	A16 SET	A12 SET	A10 SET
3.0	3,003,947	2,801,090	2,630,358	2,512,618
3.1	3,005,806	2,802,543	2,631,466	2,513,383
3.2	3,007,688	2,804,013	2,632,589	2,514,158
3.3	3,009,590	2,805,500	2,633,725	2,514,945
3.4	3,011,513	2,807,003	2,634,874	2,515,741
3.5	3,013,454	2,808,522	2,636,037	2,516,547
3.6	3,015,415	2,810,056	2,637,211	2,517,363
3.7	3,017,393	2,811,604	2,638,398	2,518,188
3.8	3,019,389	2,813,167	2,639,596	2,519,022
3.9	3,021,401	2,814,743	2,640,805	2,519,865
4.0	3,023,430	2,816,332	2,642,025	2,520,716

Table 5 Quantity of subjects with alternatives(Kg)

Depth	Original	A16 SET	A12 SET	A10 SET
3.0	1,082,168	879,312	708,579	590,840
3.1	1,084,028	880,764	709,688	591,604
3.2	1,085,910	882,234	710,810	592,380
3.3	1,087,812	883,721	711,946	593,166
3.4	1,089,734	885,225	713,096	593,962
3.5	1,091,676	886,743	714,258	594,769
3.6	1,093,636	888,277	715,433	595,585
3.7	1,095,615	889,826	716,619	596,410
3.8	1,097,610	891,388	717,817	597,244
3.9	1,099,623	892,964	719,026	598,086
4.0	1,101,652	894,553	720,246	598,937

변경을 하면서 구조물 전체 물량이 3,015톤으로 약 1.0% 증가 했지만, 형상이 변경된 부재들의 두께를 줄이면서 약 12.5%의 물량을 줄일 수 있었기 때문에, 원안 대비 11.7%의 물량 감소 효과를 얻게 되었다.

Table 5는 MTR1의 부재들 중 물량이 변경된 부재들의 물량만 합계를 낸 것이다. 춤의 깊이가 2.0m인 원안에서는 약 1,065톤이었던 물량이, 춤의 깊이가 3.6m로 구조물의 형상이 변경되면서 1,094톤으로 2.7% 물량이 증가하였으나, 단면 조합 A12 SET를 적용하면서 715톤으로 약 34.5% 물량이 줄어, 원안 대비 32.8%의 물량 감소 효과를 얻게 되었다.

MTR 지붕 구조물 전체 물량 대비 대상 부재들의 물량도 약 2,637톤 중 약 715톤으로 약 27.1%가 된다. 형상과 단면을 변경하기 전의 35.7%와 비교하면, MTR 지붕 구조물에서

Table 6 Quantity change of main subject elements(kg)

Section (truss depth)	Original Section (2.0m)	Original Section (3.6m)	A12 SET (3.6m)	
Top chord	399,409	399,409	12mm THK	245,358
CHS Ø355mm 20mm THK				
Bottom chord	242,814	241,710	10mm THK	153,738
CHS Ø355mm 16mm THK				
Diag. support	116,042	117,660	12mm THK	73,111
CHS Ø244mm 20mm THK				
Diagonal	176,933	210,424	8mm THK	138,561
CHS Ø168mm 12.5mm THK				
Horizontal	51,363	51,370	6mm THK	31,601
CHS Ø168mm 10mm THK				
Hanging	20,555	15,852	10mm THK	15,852
CHS Ø139mm 10mm THK				
Deflection(m)	-0.104870	-0.093188	-0.104765	
Total qty(kg)	2,986,757	3,015,415	2,637,211	

대상 부재들의 물량 감소가 큰 폭으로 일어났음을 알 수 있다. Table 6은 주요 최적화 대상 부재들의 물량변화를 원안과 최적안을 비교하여 나타낸 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 파라메트릭 구조해석 및 최적화 도구로 개발된 StrAuto를 활용하여, 지붕 구조물의 트러스의 춤과 단면을 변경하면서 물량을 감소시키는 형상 변경을 통한 최적화를 수행하였다. 기존 연구들에서는 형상 변경의 제약 때문에 대부분 단면과 물성을 통한 최적화를 수행하는데 그쳤으나, 본 연구에서는 설계를 꼼꼼히 검토하여 원안의 취약점과 형상 변경이 가능한 부분을 찾아내어 StrAuto의 가장 핵심적인 능력인 형상 변경을 통한 최적화를 수행했다는 점에서 중요한 의미를 지닌다.

파라메트릭 구조해석 모델링에 걸리는 시간은 일반적인 건물의 경우 전통적인 방법과 거의 비슷하지만, 본 연구의 대상과 같은 비정형 건축물은 비교할 수 없을 정도로 빠르게 작업이 가능하다. 특히 기존 방법에서 비정형의 형상 변경은 새로운 모델링을 뜻하므로 시간이 계속 늘어나지만, 파라메트릭 모델링에서는 파라메터의 변경만으로 형상 변경이 가능하므로 실시간 검토가 가능하다.

기존 설계가 많이 진행되어 구조물의 전체적인 최적화를 수행하지는 못하였지만, 본 연구에서 검토한 형상 변경을 통한 최적화 상당한 물량을 줄일 수 있었고, 실시 설계와 실제 시공에도 트러스 춤의 깊이를 3.6m로 변경한 본 연구의 결과를 적용하였다는 점에서 큰 의의를 찾을 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비 지원(16 AUDP-B100343-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Choi, H.C.** (2014) The Parametric Structural Optimization with StrAuto, *Review of Architecture and Building Science*, 58(2), pp.50~54.
- Choi, H.C., Lee, Y.J., Kim, C.K.** (2014) Optimization of Quantity of Core Walls in Tall Buildings with StrAuto Analysis, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Koorea*, 27(5), pp.451~458.
- Kim, Y.M., Lee, S.G., Choi, H.C., Kim, C.K.** (2012) A Case Study on the Field Application of Parametric Design Technique for Optimization of Outrigger System High-rise Building Structures, *J. Archi. Inst. Korea*, 28(12), pp.45~52.
- Kim, C.K., Lee, S.S., Choi, H.C.** (2010) A Study on Parametric Modeler to Generate Structural Analysis Model, *P. Comput. Struct. Eng. Inst. Koorea*, 23(1), pp.247~250.
- Lee, Y.J., Kim, C.K., Choi, H.C.** (2014) Computational Optimization for RC Columns in Tall Buildings, *J. Korea Concr. Inst. Korea*, 26(3), pp.401~409.

요 지

본 논문에서는 StrAuto를 이용하여 구조물의 형상 변경을 통한 대안을 생성하고, 이에 대한 최적화를 수행하는 과정을 상세하게 다루었다. 비정형 대공간 전시장 구조물을 대상으로 전체 형상을 파라메트릭하게 디자인하고, 가장 폭이 넓은 경간의 구조 형상을 변경하면서 물량 변화를 관측하여 최적안을 도출하였다. 기존 연구들에서는 형상 변경의 제약 때문에 대부분 단면과 물성을 통한 최적화를 수행하는데 그쳤으나, 본 연구에서는 형상 변경이 가능한 부분을 찾아내어 StrAuto의 가장 핵심적인 능력인 형상 변경을 통한 최적화를 수행했다는 점에서 중요한 의미를 지닌다. 형상 변경으로 충분한 여유를 확보하고 단면 최적화로 물량을 줄이는 프로세스를 통해, 대공간 구조물의 일부만을 대상으로 하면서도 전체 물량의 11.7%를 줄일 수 있었다.

핵심용어 : StrAuto, 형상 변형, 골조 최적화, 대공간 구조물, 파라메트릭 모델