곡면 최적화 알고리즘을 활용한 비정형 건축물 외장공사비 개산견적에 관한 연구

임장식¹ · 옥종호*

¹동일건축

Development of the Preliminary Cost Estimate Method for the Free-Form Building Facade Trade in Conjunction with the Panel Optimization Algorithm Process

Lim, Jang Sik¹ · Ock, Jong Ho*

¹DONG IL Architect & Engineering

Abstract : The outer surfaces of free form buildings contain panels with two-directional curvatures. To construct these panels, complex geometric surfaces should be divided into forms and sizes that can be manufactured and constructed efficiently. Because the bigger the curvatures of these panel, the more expensive the construction costs, these complex curvatures should go through optimal process of reinterpretation to minimize the curved surfaces with complex two-directional curvatures, which is called panel optimization. Small construction and design companies have trouble in calculating even rough estimate and cannot adjust expected construction cost of the panels based on comparison of design alternatives in conjunction with panel optimization process due to lack of knowledge and experience. This study conducts the research that can support designers' cost decision-making in the design stage of the free form buildings with respect to the panel optimization process. A 3D commercial application specialized to modeling free form shapes is used for the purpose.

Keywords : Free-Form Building, Panel Optimization, Preliminary Cost Estimate, Zebra Analysis, Curvature Analysis

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

비정형 건축물은 건물의 전체 또는 일부가 사각형 형태에서 벗어나 기울거나 좁아지거나 뒤틀린 형태이거나 자유로운 곡선 형태를 가진 건물을 말한다(김선우 2009). 이러한 비정형 건축물의 건설에서 가장 어려운 공정은 복잡한 디자인으로 이루어진 외피를 제작 및 시공하는 것이다. 이를 위해서는 먼저 복잡한 기하학적 형태의 외피를 제작과 시공이 가능한 패널형태와 크기로 나누어야 하며 나누어진 패널은 곡면의 곡률이 클수록 공사비가 증가하기 때문에 복잡한 이 방향 곡률을 갖는 곡면을 평판이나 일 방향 곡률의 패널로 변환하는 패널 최적화 과정을 거쳐야 한다.

최근 국내에서 건설된 비정형 건축물의 공사비 구성을

살펴보면 외피 공사비가 총공사비의 15~20%를 차지하고 설계단계 추정공사비 대비 실제 시공공사비 증가폭이 가장 큰 공종이며 설계자와 시공자 사이에 곡면의 곡률 확보를 위한 공사비 조정에서 빈번하게 갈등이 발생하고 있는 것으로 분석되고 있다(임장식 2013). 최적화는 부드러운 곡면의 연속성을 유지하는 범위 안에서 패널의 형태, 곡률, 크기를 조정하여 제작과 시공이 용이한 패널형태를 늘려가는 과정이다. 이러한 과정을 설계초기단계에 패널 최적화와 연계하여 외장공사비를 추정할 수 있다면 패널의 곡률 변화에 따른 공사비 변화정도를 관찰할 수 있어, 설계자는 보다 현실감 있는 공사비용의 범위를 제시할 수 있을 것이다. 또한 예산에 한계가 있다면 투입가능한 외장공사비 범위 안에서 구현 가능한 비정형 형태를 제시할 수 있어, 불필요한 갈등을 방지할 수 있을 것이다.

그러나 패널최적화 과정에는 건물형태에 따라 다양한 패널 패턴, 패널 재료의 강성, 패널 형태별 제작 및 시공 제약조건 등의 요소가 반영되어야 하기 때문에 대단히 복잡하고 전문적인 지식체계와 경험이 요구된다. 현재까지 국내·외에서 다양한 비정형 건축물이 건설되었지만 대부분 해외 저명 설계기업이 설계하면서 이러한 기술을 배타적으

* Corresponding author: Ock, Jong ho, Department of Architectural Engineering, Seoul National University of Science And Technology, Seoul 139-743, Korea

E-mail: ockjh@seoultech.ac.kr

Received April 9, 2014; revised May 12, 2014

accepted May 20, 2014

로 보호하고 있어 국내 설계기업이 쉽게 학습하여 설계 초기 단계의 외장공사비 추정에 응용할 만한 패널 최적화 관련 기술자료 확보가 대단히 어려운 실정이다.

본 연구는 비정형 건축물 설계자가 쉽게 접할 수 있는 범용 어플리케이션을 이용하여 비정형 건축물의 외장패널을 최적화하는 방법을 제시하며 최적화 결과와 국내 비정형 건설프로젝트의 외장공사에 대한 실적공사비를 접목하여 최적화 진행에 따른 공사비 변화 정도를 산출하는 방법을 제시한다. 연구결과의 적용성을 검증하기 위해 국내에서 최근 완공된 비정형 건축프로젝트의 사례연구를 수행한다.

1.1. 연구의 범위

비정형 외장디자인은 다음과 같은 11단계의 유기적인 프로세스로 진행하게 된다(박기우 2010). 패널 최적화는 프로세스 ①, ②에서 진행되며 외장공사비용은 프로세스 ③에서 ⑨까지의 외장패널 기능 설계를 마무리한 후 프로세스 ⑩에서 결정하지만 개략적인 공사비는 대부분 프로세스 ①, ②, ③의 결과에 따라 결정된다. 그러나 국내의 경우 현재까지 건축된 비정형 건축물의 경우 외장패널을 본 구조체에 연결하기 위한 서브프레임 공사비는 외장공사비가 아닌 구조체 공사에 포함하여 산정하여 왔기 때문에 본 연구에서의 외장공사비 산정은 서브프레임 공사비를 제외하고 프로세스 ①, ②에서의 패널공사비만을 대상으로 연구를 진행한다.

- ① Facade Mass Design
(외관 형태계획)
- ② Facade Material Research & System Design
(외관 구성 재료분석 및 패널시스템 계획)
- ③ Facade Structure Design
(외장 패널형태와 재료에 따른 서브 프레임 구조계획)
- ④ Facade Energy Analysis & Design (에너지 분석)
- ⑤ Facade Blast Resistant Design
(외장 폭파파괴 저항성 계획)
- ⑥ Facade Snow, Ice, Wind Analysis & Design
(자연재해에 대한 저항성 계획)
- ⑦ Facade Acoustic Analysis & Design
(외장의 형태와 재질에 따른 실내 음환경계획)
- ⑧ Facade Maintenance Design
(외장의 형태와 재질에 적합한 유지관리 방법계획)
- ⑨ Facade & Interior Collision Design
(외장형태와 건물 배치계획 적합성 분석)
- ⑩ Facade Cost Control
(외장공사비 상세견적 및 공사비 조정)
- ⑪ Facade Mock-Ups Fabrication & Installation
(실물실험 부재제작)

패널공사비는 패널의 재료와 평판, 일 방향, 이 방향 등

곡률종류에 따른 제작방법에 따라 크게 달라진다. 국내에서 건축된 비정형 건축물의 패널재료를 살펴보면 유리, 알루미늄, Glass Fiber Reinforced Concrete (GFRC) 등 다양한 재료가 사용되고 있지만 이들 중 가장 많이 사용되는 재료는 알루미늄이고 국내에서 최근 준공된 D 문화공원, J 박물관의 외장도 알루미늄으로 구성되어 있어²⁾ 본 연구는 국내의 실적공사비가 있는 알루미늄 패널로 한정하고 제작방법도 국내에서 적용한 실적이 있는 공법을 대상으로 연구를 진행한다.

1.2. 연구의 방법

본 연구는 다음과 같은 절차로 수행한다.

(1) 최적화 프로세스 개발과 개산견적 (패널 1m² 당 공사비)을 실시할 비정형 형상 도출을 위해 2000년 이후 2013년 사이 국내·외에서 건설된 비정형 건축물을 조사하고 각 건물에 많이 적용된 외피형태를 참조하여 평판 패널, 일 방향 패널, 이 방향 패널, 복합 패널로 구성된 비정형 외피형상 3개를 구축한다.

(2) 국내에서 비정형 패널을 생산하고 있는 기업의 실무자와 면담을 실시하여 국내 실적을 중심으로 제작 가능한 비정형 패널의 크기와 제작비용을 조사하고 (1)의 비정형 외피형상을 패널화한다.

(3) 최적화 과정 동안 각 패널 형태변화와 면적변화를 파라메트릭하게 측정할 수 있는 그래스호퍼(Grasshopper)³⁾ 스크립트(Script)를 개발한다.

(4) 선행연구에서 도출된 패널 최적화 알고리즘 중 실무에서 사용하기 용이한 알고리즘을 적용하여 3개 비정형 형상의 최적화를 진행한다. 최적화는 그래스호퍼의 연속성 분석기능과 곡률 분석기능을 접목하여 수행한다. 최적화를 진행하는 동안 3개 비정형 형상의 패널형태 변화를 분석하며 전반적인 곡면 형상을 유지하면서 최적화 할 수 있는 범위를 측정한다.

(5) 앞의 (3)에서 개발한 스크립트와 스프레드 시트를 연계하여 3개 비정형 형상의 최적화 진행에 따라 변화하는 패널형태별 면적을 산출한다. (2)에서 조사한 패널형태 별 제작비용을 반영하여 최적화 진행에 따른 외장패널 공사비를 산출한다.

(6) 본 연구에서 진행한 최적화 프로세스의 적용성을 확인하기 위해 국내에서 최근 준공된 D 문화공원 프로젝트를 대상으로 사례연구를 실시한다.

2) 한지연, FREE-FORM 건축의 곡면형상 구축의 유형분류 및 유형별 구축 특성에 관한 연구, 석사학위논문, 세종대학교, 2011 pp. 39~46.

3) 라이노(Rhino)의 플러그인 (plug-in) 소프트웨어로 컴포넌트(Component)간의 관계를 이용하여 스크립트를 작성할 수 있으며 사용자는 프로그래밍 언어적 학습 없이도 소프트웨어에서 제공하는 명령어를 이용하여 형태를 생성하고 변형할 수 있다.

2. 이론적 고찰

2.1. 패넬화(Panelization)

비정형 외피를 시공하기 위해서는 복잡한 기하학적 형태의 자유곡률 외피를 제작과 시공이 가능한 형태와 크기로 나누어야 하는데 이를 패넬화(Panelization)라 한다(Piegl and Tiller 2002). 패넬화 방법은 구성하고자 하는 외피의 형태나 설계자의 디자인 의도, 패넬생성 알고리즘 등 여러 고려사항에 따라 다르지만 구현하고자 하는 곡면의 종류와 패넬 형태에 따라 구분할 수 있다. 패넬형태에 따라서는 삼각형, 사각형, 다각형 등으로 구분하며 곡면의 종류에 따라서는 평판, 일 방향 패넬, 이 방향 패넬, 복합 패넬로 구분하게 된다. 선행연구⁴⁾에 따르면 평판, 일 방향 패넬, 이 방향 패넬의 구분은 패넬의 곡률크기로 분류하는데 평판 패넬은 0mm~50mm 범위에 속하는 곡률을 갖는 패넬, 일 방향 패넬은 50mm~200mm 범위의 곡률을 갖는 패넬, 이 방향 패넬은 200mm를 초과하는 곡률을 갖는 패넬들을 포함한다.

2.2. 최적화(Optimization)

비정형건축에서 설계자는 디자인 의도를 반영한 3D 형상을 생성하게 되는데 이 형상을 구현하기 위한 초기 패넬 모델은 다양하게 변화하는 곡률을 갖는 자유곡선으로 이루어져 있어 제작 및 시공에 많은 어려움이 따른다. 따라서 설계의도와 전체 형상의 변화를 수용할 수 있는 범위 내에서 자유곡선의 수를 줄이고 직선이나 호로 제작할 수 있는 부재의 수를 늘리는 최적화 과정이 필요하다 (Sheldon 2002). 최적화는 어떤 방법 및 기준으로 어느 단계까지 진행하는가에 따라 건물 형태의 시공가능 여부, 제작 및 시공 비용이 크게 달라진다. 최적화 방법에 관한 선행연구를 정리하면 다음 (1), (2), (3), (4)와 같다.

2.2.1 곡률평균화 알고리즘

비정형 외피의 개별 자유곡선의 곡률방향에 따라 양(+) 또는 음(-)의 곡률값을 측정하고 이 값의 평균을 계산하여 볼록하거나 오목한 하나의 곡률 값을 갖는 호로 변형하는 방법이다.

Fig. 1. Curvature-equalization Algorithm (Ahn 1998)

2.2.2 다중 호(Multi-arc)를 이용하는 알고리즘

비정형 곡면이 두 개 이상의 곡률을 갖는 자유곡선에 대해서 하나의 호로 변경 하는게 어려울 경우에는 두 개 이상의 호로 자유곡선을 바꾸어 최적화 하는 방법이다.

Fig. 2. Use of Multi-Arc Algorithm (Tang and Wang 2001)

2.2.3 하위분할 알고리즘

하위분할 알고리즘은 복잡한 자유곡선을 원하는 길이나 반지름 등을 가지는 작은 호나 자유곡선이 되도록 작은 단위로 나누는 것을 말하는데 자유곡선의 일정한 곡률값을 기준으로 하여 기준 이상의 곡률 구간을 더 나누어 원하는 곡률 이내로 이루어진 구간들로 만들 수 있다. 예를 들어 자유곡선을 1/2로 나누어 하위분할 하고 복잡한 곡률에 대해서 1/4 등으로 더 분할 할 수 있다.

Fig. 3. Subdivision Algorithm (Les A and Wayne 2002)

2.2.4 패넬 휨값을 이용하는 알고리즘

자유곡선의 길이 대비 휨 값을 비교하여 직선패넬로 시공해도 시각적으로 곡면형상을 이루는데 지장이 없는 범위를 측정하여 최적화 하는 방법이다.

Fig. 4. Algorithm Using Panel Bending Value (Kim 2009)

2.3. 파라메트릭 도구

파라메트릭 (Parametric) 기술을 이용한 모델링방법은 변식조건⁵⁾ 기반과 구속조건⁶⁾ 기반의 두 가지로 구분할 수 있는데 비정형 건축물의 모델링은 변식조건 기반 기법을 적용하는 것이 효율적이다. 현재 시중에 나와 있는 변식조건 기반의 디지털 도구들은 모(Mother) 프로그램이 필요한

4) 권순호 외 2명 “Mock-up 부재제작을 통한 비정형 건축 외장부재의 제작 문제점 분석 및 개선방안에 관한 연구” p.19

플러그인(Plug-in) 형태이며 그래스호퍼(Grasshopper), 파라클라우드(Paracloud), 제너레이티브 컴포넌트(Generative Component)가 있다. 파라메트릭 기술을 운용하기 위한 모델링 도구는 변수적용 및 변경이 쉽고 히스토리 피드백을 통한 변경사항 반영이 편리해야 한다(문성우 2010). 위 3개 프로그램의 활용성을 비교하면 Table 1와 같으며 본 연구는 그래스호퍼를 활용하여 연구를 진행한다.

Table 1. Comparison Of Analyzing Tools For Modeling Free-Form (Moon, 2010)

Division	Usability	Learnability	Popularity	Compatibility	Comprehensive Evaluation
Grasshopper	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●
ParaCloud	●●●	●●●	●●●●	●●●●●	●●●●
Generative Component	●●●●	●●●	●●●	●●	●●●

본 연구의 최적화 분석은 그래스호퍼에서 제공하는 지브라(Zebra) 분석과 곡률분석을 접목하여 이루어진다. 지브라 분석은 Table 2에서 보는 바와 같이 줄무늬를 이용하여 곡면과 곡면 연결부위의 위치, 접선, 곡면 연속성과 매끄러움 정도를 시각적으로 쉽게 인식할 수 있도록 표현한다(Rhino Users Guide 2008).

Table 2. Zebra Analysis & Curvature Analysis

Division	Image	Explanation
Zebra Analysis	Location Agree	Two-curved surfaces contact each other but it means to the part where there is the stripe which is not connected that there is the tangle or wrinkle.
	Tangent Line Agree	The location and tangential direction is coincided in the connection part of Two-curved surfaces but mean that curvature doesn't coincide.
	Location, Curvature And Tangent Line All Agree	It means that location, tangential direction, and curvature coincide altogether.

- 5) 번식조건 기반의 파라메트릭 모델링은 디자이너가 부여하는 객체의 규칙에 의해 증식할 수 있고 적용 가능한 방법이며 비정형 형태에 있어서도 부여된 규칙에 의한 형성 방식이기 때문에 적용 가능하다. 객체로 설정할 수 있는 범위에 있어 선택이 자유롭기 때문에 모델링이 있어서도 선택적으로 변수를 설정할 수 있다.
- 6) 구축조건 기반의 파라메트릭 모델링은 주어진 조건하에서 파라미터를 조절하여 모델링 하는 방법으로 정형의 디자인에는 그 효율성이 극대화 되지만 각각의 객체들은 고유의 행동과 고요한 객체들간의 상관관계로 인해 복잡해 질 수 밖에 없고 각각의 객체들은 다른 방식으로 생성되고 편집되는 객체들로 이루어져서 효과적으로 다룰 수 있게 되려면 수개월이 소요된다. 또한 구축조건기반의 모델링은 자유로운 형상 특히 비정형의 디자인에 적합하지 않는 방법이고 이를 개선하기 위해 개발된 파라메트릭 모델링인 번식기반의 디지털 도구로 디자인을 생성 할 수 있다.

Curvature Analysis	Positive Curvature		If the curvature is the positive value, it means that curved surface is the bowl form.
	Negative Curvature		As to the negative value, the curved surface shows the same type with the saddle-like shape.
	0 Curvature		In case the curvature value is 0, the curved surface means the flat thing in the one-way at least. (The plane, cylinder, and Gaussian curvature of the cone are 0)

곡률분석은 곡선 또는 곡면의 휨 정도를 곡률의 반지름과 최대 곡률 값을 기준으로 시각적으로 색으로 표시한다. 본 연구에서 활용하는 지브라 분석을 적용한 선행연구로는 한지연(2011)의 연구를 들 수 있다. 이 연구에서는 비정형 외피를 평판⁷⁾, 일 방향⁸⁾, 이 방향⁹⁾ 패널로 구분하고 패널들의 연속성 여부를 평가하였으나 본 연구가 제시하는 바와 같이 최적화 진행에 따른 곡률 및 곡면유형 변화분석, 적정 최적화 범위 분석 등과 대한 사항은 다루지 않았다.

2.4. 비정형 건축물 외장공사비

비정형 건축물 외장공사비의 상세견적이나 개산견적을 다른 국내의 선행연구는 실시된 바 없다. 비정형 건축공사 실적공사비의 경우도 해당 공사를 수행한 기업에서 건설비용의 상세한 공개를 원치 않아 신뢰할 수 있는 공사비 자료의 확보가 어려운 실정이지만, 임장식(2013)은 국내 비정형 건축공사 외장공사를 수행한 전문기업 인터뷰를 통하여 외장공사 비용이 대략 총 건축공사 비용의 15~20% 정도를 차지하는 것으로 분석하였다.

3. 최적화 분석 대상

3.1. 비정형 형상

비정형 건물은 설계자의 설계의도에 따라 건물 별로 각기 다른 곡면형태와 곡률로 표현되기 때문에 일반화할 수 있는 설계데이터가 거의 없을 뿐 만 아니라 건축물 별 세부 설계 자료에 대하여 대부분 설계자가 공개를 꺼리는 관계로 본 연구를 위한 구체적 데이터 확보가 어려웠다. 본 연구는 최적화하기 위한 비정형 형상 구축을 위해 선행연구자의 연구내용¹⁰⁾을 중심으로 국내외에서 최근 완공된 비정

7) 본 연구에서는 콜드밴딩 조인트를 실시한다는 가정하에 곡률값 0~50mm로 산정하였고 녹색으로 표현된다.

8) 일방향 패널의 범위는 50mm~200mm로 산정, 노랑색으로 표현된다.

9) 이방향 패널의 범위는 200mm이상으로 산정, 빨강색으로 표현된다.

10)한지연, FREE-FORM 건축의 곡면형상 구축의 유형분류 및 유형별 구축특성에 관한 연구, 석사학위논문, 세종대학교, 2011 pp. 39~46

형 건축물의 외피형태와 마감 사례를 조사하고 각 사례에서 일반적으로 적용된 패널형태를 추출하여 모델링하는 방향으로 연구를 진행하였다. Table 3는 비정형 형상 도출을 위해 참고한 사례와 본 연구를 위해 모델링한 외피 형태를 보여준다(Table 3 둘째 줄 “분석대상 외피모델링 형태” 참조). 모델링한 외피형태는 각 참조사례의 가장 곡률이 큰 부분의 형태(Table 3 첫째 줄 “참조사례”의 원형 부분)를

Table 3. Subject Of Optimization Free-Form Facade

Case 1		Case 2		Case 3

Yeosu Expo Theme-Pavilion (2012)		Hungerburg Train Center (2007)		Mercedes Benz Museum (2006)

(The form of modeling of the analysis object)		(The form of modeling of the analysis object)		(The form of modeling of the analysis object)	
Area : 104.19㎡		Area : 99.01㎡		Area : 103.41㎡	
Panel Classification	Flat 3	Panel Classification	Flat 2	Panel Classification	Flat 0
	One-way 8		One-way 10		One-way 0
	Two-way 89		Two-way 88		Two-way 100

표현하도록 모델링하였다.¹¹⁾

모델링한 비정형 형상의 면적은 각 참조사례의 곡률분포를 충분히 반영할 수 있도록 100㎡ 기준, 오차범위 ±5㎡로 설정하였으며 비정형 형상의 패널형태는 기존 비정형 건축물에서 가장 많이 사용된 사각형 형태로 계획하였다(한지연 2011). 각 패널의 크기를 결정하기 위해 국내 비정형 건축 프로젝트인 D 문화공원의 외장패널 제작업체의 전문가와 면담을 실시하였으며 면담결과를 기반으로 패널크기를 1,600mm x 1,200mm 이하로 결정하였다¹²⁾.

비정형건축에서 가장 많이 사용되고 있는 재료가 알루미늄인 것을 고려하여 3개 비정형 형상의 패널도 알루미늄으로 제작하는 것으로 가정하였다. 알루미늄 패널의 경우 MPSF 방법으로 최대 제작할 수 있는 곡률 값은 300mm

으로, 이 값을 초과하는 패널에 대해서는 Fig. 4에서 설명한 하위분할 방법을 적용하여 위 패널 폭의 1/2 크기까지 패널화 하였다. 각 사례 모두 패널 개수는 100개로 한정하였으며 모델링한 결과 각 형상은 각기 다른 종류의 패널로 구성되어 있음을 확인할 수 있었다(Table 3 넷째 줄 “패널 형태분류”).

3.2. 최적화 분석 알고리즘

최적화 분석은 Fig. 4의 알고리즘 중 이해하기 쉽고 적용이 용이한 김선우(2009)의 알고리즘을 참조하여 Fig. 5과 같이 패널 호의 높이 값 L2를 단계적으로 조정하도록 하였다. 즉, P1과 P2 사이인 L2를 100등분하고 P1/P2 값이 P2 점으로부터 0, 0.2(20/100), 0.4(40/100), 0.6(60/100), 0.8(80/100), 1(100/100)인 점을 지나는 곡률로 최적화를 실시하였다.

Fig. 5. Panel Optimization Method

사각형으로 분할된 패널의 최대 높이 값 L2는 각 패널 별로 모두 다른 값을 갖게 되며 한 패널 안에서도 네모서리가 각기 다른 높이 값을 갖게 된다. 따라서 최적화를 진행하는 동안 자동적으로 각 패널의 최대 높이 값과 네 모서리의 높이 값을 측정할 수 있도록 Fig. 6와 같이 그래프호퍼 스크립트를 작성하였다. 스크립트는 Item 컴퍼넌트를 통해 모서리 네 포인트를 설정하고 직선으로 연결하는 Ln 컴퍼넌트를 생성하였다. 생성된 라인의 1/2 위치에 포인트(P2)를 생성하였고 외피의 곡면라인의 최대값에 포인트(P1)를 설정하여 높이에 대한 라인(L2)을 설정하였다. 이렇게 설정된 라인은 슬라이드 바를 이용하여 0.00~1.00까지의 값을 가지는 100개의 포인트(L2)에 100개의 포인트 생성으로 분할하였고 분할된 라인(L2)은 단계별로 IntCrv 컴퍼넌트를 통해 커브라인을 생성가능하게 하였다. 생성된 네곡선은 EdgeSrf 컴퍼넌트를 통해 분할된 면을 생성하였고 Area 컴퍼넌트를 이용하여 각 패널의 면적을 스프레드 시트 기능을 활용 엑셀과 연동하였다. 또한 각 포인트, 패널에 Tag 컴퍼넌트를 사용하여 연동시킴으로써 각 패널과 패널 포인트의 위치를 확인할 수 있게 하였으며 향후 스페이스 프레임 적용시 구조검토를 위한 연동이 가능하도록 하였다.

11) 모델링 방법은 2D 이미지를 기반으로 커브라인을 추출하였음. 라이노는 Loft, Patch, Sweep1, Sweep2 등의 다양한 방법으로 곡면 서페이스를 생성할 수 있고, 본 연구에서는 여러 개의 커브를 연결하여 서페이스를 구성하는 NetworkSrf를 사용하여 비정형 외피를 생성하였다.

12) 롤러압연기, 절곡기, 유압프레스 등을 이용하여 제작할 수 있는 평판이나 일 방향 패널과 달리 이 방향 패널은 자동수치제어에 의한 기계제작을 하여야 하며 국내에서는 멀티포인트 스트레칭 포밍공법(MPSF - Multi Points Stretching Forming)으로 제작하고 패널 크기는 최대 1,600mm x 1,200mm 까지 가능한 것으로 조사되었다. MPSF는 작은 프레스를 수십개 배열하고 주물모양에 따라 자동으로 눌러서 형태를 제작하는 방식이며 알루미늄 패널의 경우 최대 제작할 수 있는 곡률 값은 300mm 이다.

Tag의 포맷은 Format("point 또는 panel - {0}", x)를 적용하여 생성되는 면과 포인트에 대하여 자동적으로 번호를 부여하게 하였다.

Fig. 6. panel Optimization Grasshopper Script

비정형 패널 모델링에 있어 패널을 본 구조체와 연결하는 서브프레임은 외장패널의 지오메트리가 변경될 경우 그 노드 포인트가 변경되어 외장시스템의 구조적인 문제를 야기하게 되므로 반드시 외장패널 지오메트리를 확정 한 후 서브프레임의 노드포인트를 확인하여야 한다(오병석 2012). 비정형 건축물에 사용되는 서브프레임은 싱글 레이어 (Single Layer), 더블 레이어 (Double Layer), 퍼린 (purlin) 시스템 등이 있으며 각 시스템 별로 특징이 다르다. 본 연구는 최근 국내에서 준공된 D 문화공원 건축물 서브프레임을 설계하고 제작한 실무자 2인과 면담조사를 실시하여 좌표관리에 용이하고 구조적으로 안전성 확보가 탁월한 더블레이어 시스템으로 외장패널을 지지하는 것으로 가정하고 각 노드 포인트에 대한 태그 작업을 실시해 패널의 위치와 서브프레임의 동일한 위치를 확보하였다.

4. 최적화분석

4.1. 연속성분석과 곡률분석

Table 4는 각 형상별로 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0의 최적화 포인트에서 연속성분석과 곡률분석을 실시한 결과이다. 모든 사례의 초기형상 (최적화 포인트 0)에서 곡면 위치, 접선, 곡률이 모두 일치하고 있음을 보여준다. 그러나 최적화 포인트 0.2에서 사례 2는 대부분 패널의 곡률이 일치하고 있지만 사례 1의 경우는 좌상단부에 곡률이 일치하지 않는 부분이 미세하게 나타나고 있으며 사례3의 경우는 형상 중간부분에서 상당부분 곡률이 일치하지 않는 것을 알 수 있다. 최적화 포인트 0.4에서 사례1은 곡률이 일치하지 않는 부분이 뚜렷이 증가하고 있으며 사례2의 경우도 형상의 상단부와 중간부분에 곡률이 일치하지 않는 부분이 나타나고 있다.

Table 4. The Results Of Zebra And Curvature Analysis On Each Free-Form

	Optimization Point	Zebra Analysis	Curvature Analysis
Case 1	0		
	0.2		
	0.4		
	0.6		
	0.8		
	1		
Case 2	0		
	0.2		
	0.4		
	0.6		
	0.8		
	1		

Case 3	0		
	0.2		
	0.4		
	0.6		
	0.8		
	1		

Table 5. The Variation Of Each Panels For Shaping Forms After Optimization

Case 1						
Division	Range 0	Range 0.2	Range 0.4	Range 0.6	Range 0.8	Range 1
Flat	3	8 (▲5)	14 (▲11)	36 (▲33)	63 (▲60)	87 (▲84)
One-way	8	11 (▲3)	25 (▲17)	31 (▲23)	23 (▲15)	5 (▼3)
Two-way	89	81 (▼8)	61 (▼28)	33 (▼56)	14 (▼75)	8 (▼81)
Case 2						
Division	Range 0	Range 0.2	Range 0.4	Range 0.6	Range 0.8	Range 1
Flat	2	3 (▲1)	10 (▲8)	17 (▲15)	35 (▲33)	76 (▲74)
One-way	10	12 (▲2)	15 (▲5)	29 (▲19)	40 (▲30)	14 (▲4)
Two-way	88	85 (▼3)	75 (▼13)	54 (▼34)	25 (▼63)	10 (▼78)
Case 3						
Division	Range 0	Range 0.2	Range 0.4	Range 0.6	Range 0.8	Range 1
Flat	0	7 (▲7)	11 (▲11)	35 (▲35)	60 (▲60)	100 (▲100)
One-way	0	16 (▲16)	32 (▲32)	10 (▲10)	22 (▲22)	0 (0)
Two-way	100	77 (▼23)	57 (▼43)	55 (▼45)	18 (▼82)	0 (▼100)

Table 5는 곡률분석 결과 각 사례의 패널형태 변화를 정리한 것이다. 사례1의 경우는 최적화 포인트 0.4에서 이 방향 패널이 31% 감소(28개 감소) 하면서, 최적화 포인트 0.4와 0.6 사이에서 이 방향 패널의 50% 이상이 일 방향과 평판 패널로 바뀌었으며 최적화 포인트 1에서 9%의 패널이

이 방향 패널로 남았다.

사례2의 경우는 최적화 포인트 0.4에서 이 방향 패널이 15% 감소(13개 감소) 하면서 일 방향 패널이 5개, 평판이 8개 증가하였으며 사례 1과는 조금 달리 최적화 포인트 0.6와 0.8 사이에서 이 방향 패널의 50% 이상이 일 방향과 평판 패널로 바뀌었고 최적화 포인트 1에서 9%의 패널이 이 방향 패널로 남았다.

사례3의 경우는 최적화 포인트 0.4에서 이 방향 패널이 43% 감소(43개 감소) 하면서 사례2와 유사하게 최적화 포인트 0.6와 0.8 사이에서 이 방향 패널의 50% 이상이 일 방향과 평판 패널로 바뀌었으며 최적화 포인트 1에서는 모든 패널이 평판으로 변환되었다.

4.2. 곡면 연속성과 최적화 범위

위에서 논의한 연속성 분석 결과 각 패널 간 곡면의 위치, 접선, 곡률의 일치 정도를 개략적으로 인식할 수 있고 곡률분석을 통하여 각 패널 형태의 변화를 판단할 수는 있지만 이들 분석결과 만으로는 최적화가 비정형 외관 전반을 어떤 형태로 변화시켰는지 판단하기 어려우며 결과적으로 적절한 최적화 범위 설정이 어렵다.

Table 6. 3D View For Distinguishing Transformation Of Each Panel

Optimization Point	Case 1	Case 2	Case 3
0.2			
0.4			
0.6			
0.8			

이러한 문제점을 보완하는 방법으로 본 연구는 그래스호퍼 스크립트를 활용하여 Table 4 각 사례들의 곡률분석 결과 중 원으로 표시한 부분의 패널들을 추출하여 Table 6과 같이 곡면 연속성 변화를 면으로 구성하는 프로세스를 제시한다. 이 프로세스는 각 사례의 최적화 단계별로 곡면이 이 방향에서 일 방향, 평판으로 변화하는 과정을 잘 확인할 수 있는 부위를 선정하고 그래스호퍼의 Silhouette기

능, Mark Curve Start & End기능을 활용해 패널 커브라인의 곡면유지 정도를 시각적으로 나타내는 액티비티를 포함한다.

Fig. 7는 Table 5의 데이터를 그래프로 나타낸 것이다.

각 사례별로 각 최적화 포인트에서 이 방향 패널의 감소량, 일 방향 패널과 평판 패널의 증가량을 시각적으로 보여준다. Table 5, Table 6과 Fig. 7를 근거로 각 사례의 최적화 범위와 관련된 사항을 분석하면 다음과 같다.

Fig. 7. Graph Of Chage Of Panel Types

(1) 사례1의 경우, 최적화 포인트 0.4까지 31%의 이 방향 패널이 변환되었는데 Table 6에서 보는 바와 같이 0.4포인트에서 가로라인 ②번을 따라 곡면의 연속성이 떨어지고 있음을 인식할 수 있다. 최적화 포인트 0.6에서는 이러한 현상이 가로라인 ②, ③, 세로라인 ②번을 따라 뚜렷해 집

을 알 수 있어, 곡면의 연속성을 유지할 수 있는 최적화는 0.4-0.6의 범위 중 0.4 포인트에 가까운 범위 이내가 적절할 것으로 분석된다.

(2) 사례2의 경우, 최적화 포인트 0.4까지 15%의 이 방향 패널이 변화하였는데 Table 6에서 보는 바와 같이 포인트 0.4에서 가로라인 ②번을 따라 곡면의 연속성이 미세하게 떨어지고 있음을 알 수 있다. 최적화 포인트 0.6까지 39%의 이 방향 패널이 변환되면서 연속성이 떨어지는 현상이 가로라인 ②, ③, 세로라인 ②번을 따라 심화되고 있다. 최적화는 0.4-0.6의 범위 중 사례1보다는 0.6포인트에 가까운 구간 이내가 적절할 것으로 분석된다.

(3) 사례3의 경우, 최적화 포인트 0.2까지 23%, 0.4까지 43%의 이 방향 패널이 일 방향이나 평판으로 변화하였는데 Table 6.에서 보는 바와 같이 포인트 0.4에서 세로라인 ③번을 따라 곡면의 연속성이 뚜렷하게 떨어짐을 알 수 있다. 가로방향 패널의 변화를 확인하기 어려우나 세로라인의 변화를 고려할 때 최적화 범위는 0.2-0.4범위가 적절할 것으로 분석된다.

위 (1), (2), (3)에서 보는 바와 같이 각기 다른 패널 특징을 가진 외피들의 최적화 범위는 각기 다름을 알 수 있다. 즉, 일 방향 패널 곡률에 근접하는 이 방향 패널이 많은 사례3의 경우는 사례 1, 2 보다 최적화 폭이 좁은 반면 사례 2와 같이 이 방향 패널의 곡률 값이 큰 패널들은 최적화할 수 있는 폭이 커짐을 알 수 있다.

4.3. 최적화에 따른 패널 공사비

최적화 진행에 따라 각 패널종류 별 제작 및 시공비용을 반영하게 되면 비정형 외장공사비를 산정할 수 있으며 최적화 진행에 따라 절감할 수 있는 공사비를 산출할 수 있고 반면에 예산의 범위 안에서 표현할 수 있는 외장 곡면의 곡률 정도와 곡률의 연속성 모습 등을 설정할 수 있을 것이다.

본 연구는 비정형 건축물 프로젝트의 실제 외장패널 제작비용을 알아보기 위해 국내 D 문화공원의 발주처 실무자와 면담을 실시한 결과 1㎡당 각 패널의 예정전적금액과 낙찰금액을 Table 7과 같이 조사하였다.

Table 7. Production Cost Of External Panel Of D Park

Division	Estimated Cost	Contract Price (77%)	Production Cost Rate	Note
Flat	₩798,380	₩614,753	1	Overhead + VAT (30%)
One-way	₩872,673	₩671,958	1.1	
Two-way	₩1,729,720	₩1,331,884	2.17	

조사결과 평판패널과 이 방향 패널의 제작비용은 약 2배가 차이 나는 것으로 나타났고, 일 방향 패널의 제작비용은 평판 패널 제작비용과 거의 차이가 없는 것으로 분석되었

다. 본 연구는 개선견적을 위해 그래스호퍼에서 지원하는 스프레드시트 기능을 이용하여 각 패널의 면적을 산출하고 위 제작비용을 적용하여 개선견적하였으며 결과는 Table 9와 같다.

(1) 사례 1의 경우, 연속성이 유지되는 구간의 최적화는 0.4 포인트에 가까운 범위 이내가 적절한 것으로 나타났으며 제작비용 절감률을 확인해본 결과 최적화 범위 0.2에서는 6.78% 절감되었고 0.4에서는 22.26%, 0.6에서는 40.84%, 0.8에서는 47.98%, 1에서는 49.95% 절감되는 것으로 나타났다.

(2) 사례 2의 경우, 연속성이 유지되는 구간의 최적화는 0.6 포인트에 가까운 구간 이내가 적절한 것으로 나타났으며 최적화 제작비용 절감률을 확인한 결과 최적화 범위 0.2에서는 3.19% 절감되었고 0.4에서는 9.75%, 0.6에서는 21.01%, 0.8에서는 36.00%, 1에서는 44.40% 절감되는 것으로 나타났다.

(3) 사례 3의 경우, 연속성이 유지되는 구간의 최적화는 0.2-0.4 구간이 적절한 것으로 나타났으며 제작비용 절감률을 확인한 결과 최적화 범위 0.2에서는 11.24% 절감되었고 0.4에서는 22.69%, 0.6에서는 24.44%, 0.8에서는 44.98%, 1에서는 54.76% 절감되는 것으로 나타났다.

(4) Table 5.의 분석을 바탕으로 개선견적을 실시해본 결과 사례별 적정 최적화 포인트에서 최적화를 하게 되면 시각적인 왜곡을 최소한으로 하면서 초기 계획금액 대비 약 20%를 절감할 수 있는 것으로 분석되었다.

Table 8. The Results Of Approximate Estimation Of Each Case

Case 1						
Division	Range 0	Range 0.2	Range 0.4	Range 0.6	Range 0.8	Range 1
Flat(m ²)	2.26	9.62	18.62	50.95	78.98	98.99
One-way(m ²)	13.84	18.66	35.16	37.36	19.95	1.41
Two-way(m ²)	87.70	75.71	49.35	14.37	3.37	1.59
Total(m ²)	104.19	103.64	103.13	102.68	102.30	102.00
Production Cost Rate ¹³⁾	207.8	193.69	161.52	122.9	108.1	103.9
Case 2						
Division	Range 0	Range 0.2	Range 0.4	Range 0.6	Range 0.8	Range 1
Flat(m ²)	3.42	6.50	17.17	23.85	42.59	77.72
One-way(m ²)	17.45	18.22	17.15	27.67	35.42	11.92
Two-way(m ²)	78.14	73.51	63.32	44.33	18.99	7.34
Total(m ²)	99.01	98.23	97.64	95.85	96.99	96.97
Production Cost Rate	191.7913	185.6761	173.0978	151.5032	122.7403	106.6452

13)개선견적 비 = (평판패널 면적 * 1) + (일 방향 패널 면적 * 1.0930) + (이 방향 패널 면적 * 2.1665)

Case 3						
Division	Range 0	Range 0.2	Range 0.4	Range 0.6	Range 0.8	Range 1
Flat(m ²)	0.00	5.55	9.02	34.32	60.90	101.35
One-way(m ²)	0.00	15.72	33.84	10.24	23.76	0.00
Two-way(m ²)	103.41	81.30	59.21	57.12	16.80	0.00
Total(m ²)	103.41	102.57	102.06	101.69	101.46	101.35
Production Cost Rate	224.0433	198.8645	173.1999	169.2781	123.2664	101.3542

5. 사례연구

본 연구는 범용 소프트웨어를 활용한 비정형 외장패널의 최적화 프로세스로서 (1)최적화 분석 알고리즘의 설정, (2)패널변환 데이터를 파라메트릭하게 추적할 수 있는 스크립트의 작성, (3)연속성분석 및 곡률분석, (4)최적화에 따른 패널형태 변화분석 방법을 제시하고 각기 다른 곡률특성을 가진 3가지 비정형 외피를 대상으로 최적화 테스트하였고, (5) 외장패널 제작비용을 적용하여 개선견적 하였다.

이와 같은 프로세스의 실제 프로젝트 적용성을 확인하기 위해 국내에서 최근 완공된 D 문화공원 프로젝트를 대상으로 사례연구를 실시하였다. 대상 건축물은 국내 최대 규모 비정형 건축물로서 이 건물의 외피는 약 45,000여장의 알루미늄 패널로 구성되어 있다. 사례연구의 범위는 전체 건물외피 중 Fig. 8에서 보는 바와 같이 가장 곡률이 큰 부분을 선정하였으며 해당 면적은 552.13m² 이었다. Fig. 8의 (a)는 D 문화공원의 전체 외관을 보여주며 (b)는 전체 외피를 구성하고 있는 패널들을 평판, 일 방향, 이 방향 패널로 구분한 형상이며 (c)는 본 연구에서 사례연구 대상으로 선정한 부분이다. 사례연구 대상부분은 1,600mm x 1,200mm 이하 크기의 패널로 마감하는 것으로 설정하였으며 곡률이 큰 부분은 이 폭의 1/2 크기까지 하위분할하여 414개의 패널로 구성하였다.

Fig. 8. The case study object

Table 9의 (a)는 사례연구의 연속성 분석결과를, (b)는 곡률 분석결과를, (c)와 (d)는 (b)의 원형 부분을 확대하여 곡면의 연속성 변화를 보여주기 위한 것으로 패널면과 패널라인을 추출한 것이다. (a)의 연속성 분석결과를 보면 최

적화 포인트 0.4에서 곡면 좌측상부의 연속성이 미세하게 떨어지면서 최적화 포인트 0.6에서는 우측 상부의 곡면이 흐트러지고 있는 것을 알 수 있다.

Table 9. Zebra Analysis & Curvature Analysis

Division	(a) Zebra Analysis	(b) Curvature Analysis	(c) Surface	(d) Curve & Line
0.2				
0.4				
0.6				
0.8				

(c)와 (d)는 (b)의 내용 중 최적화 포인트 0.2곡률 분석 부분에 원으로 표시한 영역의 패널을 추출하여 각 최적화 포인트 별로 패널형상 변화를 3D 화한 것이다. 최적화 포인트 0.2에서는 곡면의 변화를 인식하기 어려우나 0.4에서는 가로라인 ②, ③으로 연결되는 패널의 곡선이 직선으로 완화되고 0.6에서 그 정도가 심화되고 있으며 0.8에서는 곡면의 왜곡 정도가 심함을 쉽게 인식할 수 있다.

Table 10. The panel type change according to the optimization and rough estimate

D Project						
Division	Range 0	Range 0.2	Range 0.4	Range 0.6	Range 0.8	Range 1
Flat	30	39 (▲9)	78 (▲48)	151 (▲121)	288 (▲258)	414 (▲384)
One-way	29	66 (▲37)	144 (▲115)	149 (▲120)	66 (▲37)	0 (▼29)
Two-way	355	309 (▼46)	192 (▼163)	114 (▼241)	60 (▼295)	0 (▼355)
Approximate Estimate	1116.9185	1041.2557	869.6825	751.8032	656.3814	551.2762

Table 10은 사례연구의 초기형상이 평판 30, 일 방향 패널 29, 이 방향 패널 355개로 곡률이 심한 형상인 것을 말해 준다. Fig. 9는 Table 10의 데이터를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 7의 사례1 그래프와 유사하며 최적화 범위도 0.4-0.6의 범위가 될 것으로 판단할 수 있으나 패널 구성은 사례3과 유사하게 일 방향 패널의 곡률에 근접하는 곡률을 갖는 이 방향 패널이 많은 형태로 분석되었다. 개산전적 결과도 마찬가지로 최적화 포인트 0.4의 구간에서 약 20%의 외장패널 제작비용이 절감되는 것으로 확인되었다.

Fig. 9. The panel increase and decrease according to D project optimization range and rough estimate Project

6. 결론

패널최적화는 부드러운 곡면의 연속성을 유지하는 범위 안에서 패널의 형태, 곡률, 크기를 조정하여 제작과 시공이 용이한 패널의 적용범위를 넓혀가는 과정이다. 설계 초기단계에서 설계의도에 적합한 곡면형태를 확보하면서 곡률을 완화할 수 있는 방법을 활용할 수 있다면 공사비용을 절감하는 효과를 기대할 수 있을 것이다. 본 연구는 비정형 건축물 설계자가 쉽게 접할 수 있는 범용 어플리케이션을 이용하여 비정형 외장패널을 최적화하는 프로세스를 제시하고 외피의 곡면형상에 따른 최적화 관련 기술자료를 제공코자 하였다.

이를 위해 국내외에서 최근 건설된 비정형 건축물의 외피 분할형태, 구축방법, 재료 등을 조사하고 외피가 평판, 일 방향 패널, 이 방향 패널로 복합적으로 구성되어 있는 3개 건축물의 외장패널 구성을 참조하여 최적화 학습을 위한 3가지 형태의 스터디 곡면 사례를 구성하였다. 국내시장의 현 기술상황을 반영하기 위해 국내 최대규모 비정형 건축 프로젝트인 D역사문화공원의 외장패널 제작업체의 전문가와 면담을 실시하고 모델링 패널크기를 1,600mm x 1,200mm 이하로 결정하였으며 각 사례 모두 패널 개수는 100개로 한정하였다. 최적화에 따른 패널형태의 변화를 추적하기 위해 외장패널을 평판 (0mm~50mm의 곡률 패널), 일 방향 패널 (50mm~200mm 범위의 곡률 패널), 이 방향 패널 (200mm초과 곡률 패널)로 분류하였다.

범용 소프트웨어를 활용한 비정형 외장패널의 최적화 프로세스로서 (1)최적화 분석 알고리즘 설정, (2)패널변환 데이터를 파라메트릭하게 추적할 수 있는 스크립트 작성, (3)연속성분석 및 곡률분석, (4)최적화에 따른 패널형태 변화 분석 방법, (5)최적화 범위별 개산전적을 실시하여 왜곡되

는 면을 최소화 하면서 제작비용을 절감할 수 있는 최적화 포인트를 제시하였다. 연속성분석 및 곡률분석은 그래스호퍼의 지브라 분석과 커버춰 (curvature) 분석 기능을 적용하였으며 각기 다른 곡률특성을 가진 3가지 비정형 외피를 대상으로 최적화를 테스트하였다. 테스트 결과 각기 다른 패널 특징을 가진 외피들의 최적화 범위는 각기 다름을 확인할 수 있었지만 제작비용 절감액은 비슷한 것으로 나타났다.

본 연구가 제시한 프로세스의 실제 프로젝트 적용성을 확인하기 위해 국내에서 최근 완공된 D역사문화공원 프로젝트를 대상으로 사례연구를 실시하였다. 사례연구 범위는 전체 건물외피 중 가장 곡률이 큰 부분을 대상으로 실시하였다. 그 결과 적정최적화 범위에서 동일한 왜장패널 제작비용을 절감 할 수 있는 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 한국연구재단 연구과제인 “비정형 건축 Facade의 품질제고를 위한 실증적 연구”의 지원으로 수행되었습니다.

Reference

- An, J., Y. (2011). “A Study on the Lessons Learned for Improving Efficiency of Free-Form Facade Construction”, Seoul National University Of Science And Technology, Korea, pp. 22-35.
- An, J. Y., Jang H. S., and Ock, J. H. (2010). “A Study on the Development of the Cost Estimation Standard through the Analysis of the Typical Free-Form Buildings Facade Elements”, Proceedings of KICEM Annual Conference, KICEM, 13, pp. 351-353.
- Ahn, Y. J., Kim, H. O., and Lee, K. Y., (1998). “G1 Arc Spline Approximation of Quadratic Bezier Curves”, Computer-Aided Design, 30(8), pp. 615-620.
- Han, Z. Y. (2011). “A Study on Classification and Feature of Double-curved Surface Fabrication Techniques in Freeform Architecture, Sejong University, Korea, pp. 39-46.
- Kim, S. W. (2009). “Classification and Optimization of IrregularShaped Building Panels by Fabrication Methods”, Yonsei University, Korea, pp. 27-33.
- Kwen, S. H., Shim, H. W., and Ock, J. H. (2011). “A Study on the Problem Analysis and Quality Improvement in Fabricating Free-Form Buildings Facade Panels through Mock-up Panels Production”, Korean Journal Of Construction Engineering And Management, KICEM, 12(3), pp. 11-21.
- Lim, J. S. (2013). “A Study on the Cost Estimates for Optimization in the Design Phase Free-Form Building Facade”, Seoul National University of Science and Technology, Korea, pp. 1-2.
- Les A. Piegl and Wayne Tiller (2002). “Biarc Approximation of NURBS Curves”, Computer-Aided Design, 34, pp. 807-814.
- Moon, S. W. (2010). “A Study on the Designs Systemization of Architecture Using Parametric Technology”, Ajou University, Korea, pp. 23-27.
- Oh B. S. (2012). “Dongdaemun Design Plaza & Park External Panel System”, Presentation Material Of Buildingsmart Association CM Contest.
- Park, G. (2009). Presentation Material Of SCEA Lecture Of Seoul National University Of Science And Technology
- Xunnian T., and Guozhao W. (2001). “Planar Point Set Fairing and Fitting by Arc Splines”, Computer-Aided Design, 33, pp. 35-43.
- Rhino User’s Guide, <<http://download.rhino3d.com/download.asp?id=Rhino4Guide/>> (Apr. 01, 2013)
- Wikipedia , <<http://en.wikipedia.org/wiki/Murinsel>> (Jan. 12, 2013)
- Jeongok Prehistory Museum, <<http://www.jgpm.or.kr>> (Jan. 12, 2013)
- Wikipedia, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Saint-Lazare>> (Jan. 12, 2013)
- Seoul Design Foundation, <<http://www.seouldesign.or.kr/plaza2/summary.jsp>> (Jan. 12, 2013)

요약 : 비정형 건축물의 건설에서 가장 어려운 공정은 복잡한 디자인으로 이루어진 외장패널을 제작 및 시공하는 것이다. 설계자는 비정형 건물의 부드러운 곡면형태를 훼손하지 않는 범위 안에서 복잡한 곡면을 갖는 패널의 양을 축소하여 패널제작 및 시공비용을 최적화함이 필요하다. 특히 설계초기단계에서 다양한 건축외관을 디자인하고 각 설계대안의 예상공사비를 추정하면서 설계의도를 충족하는 적절한 대안을 찾는 것은 대단히 중요하다. 하지만 대부분의 설계사무소들은 비정형 건축물의 패널 최적화에 대한 이해, 기술 및 데이터가 부족하여 초기설계 단계에서 예상공사비 산정, 설계 대안 비교를 통한 예상공사비 조정 등의 업무를 효과적으로 수행하지 못하고 있는 실정이다. 본 연구는 비정형 건축물 설계자가 쉽게 접할 수 있는 범용 어플리케이션을 이용하여 비정형 건축물의 외장패널을 최적화하는 방법을 제시하며 최적화 결과와 국내 비정형 건설프로젝트의 외장공사에 대한 실적공사비를 집목하여 최적화 진행에 따른 공사비 변화정도를 산출하는 방법을 제시한다. 연구결과의 적용성을 검증하기 위해 국내에서 최근 완공된 비정형 건축프로젝트의 사례연구를 수행한다.

키워드 : 비정형 건축물, 패널 최적화, 개산견적, 지브라 분석, 곡률 분석