

# Mock-up 부재제조를 통한 비정형 건축 외장부재의 제작 문제점 분석 및 개선방안에 관한 연구

A Study on the Problem Analysis and Quality Improvement in Fabricating  
Free-Form Buildings Facade Panels through Mock-up Panels Production

권 순 호\*                      심 현 우\*\*                      옥 종 호\*\*\*  
Kwen Soon-Ho                      Shim, Hyoun-Woo                      Ock, Jong-Ho

## 요 약

비정형 건축물은 건축가의 디자인 의도를 반영한 다양한 형태의 외장 디자인을 포함한다. 이러한 비정형 형태의 외장부재는 NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 라 불리는 이 방향 곡률로 구성된 불규칙한 자유곡선면을 포함하고 있어 실제 외장부재의 생산 및 시공을 위해서는 3차원 비정형 BIM 기술을 적용한 패널최적화 단계를 거쳐야 한다. 본 연구에서는 역공학(Reverse Engineering) 기법을 근간으로 사례연구를 통해 비정형 건축물 BIM 도구인 디지털 프로젝트를 활용하여 패널형태를 구축하고 패널 최적화 결과를 도출한다. 최적화 결과 도출된 비정형 패널부재의 곡률 형상에 따른 Mock-Up 패널제작을 통해 패널종류에 따른 제작 용이성을 테스트하고 레이저 스캐닝 기술을 사용하여 설계한 패널과 생산된 패널과의 데이터를 비교함으로써 이방향 곡률 곡면부재의 제작정밀도를 분석한다. Mock-Up 부재 제작 시 전문가 인터뷰를 통하여 국내에서 수행되고 있는 현행 비정형 외장부재 생산방식의 문제점을 도출하고 개선방안을 제시한다.

키워드 : 비정형, 역공학, As-Planned, As-Built, 패널화, Mock-up, BIM

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

1990년대 중반까지만 해도 대부분의 비정형 건축물(Free-Form Buildings)들은 2D 도면의 한계, 비정형 외장부재 생산의 어려움, 시공 정밀도 확보의 곤란 등 많은 문제점으로 인해 건축하기에 대단히 어려운 건축물로 인식되어 왔다. 그러나 최근 파라메트릭 모델링 기법을 근간으로 하는 BIM (Building Information Modeling) 기술의 발달과 IT 기술을 접목한 비정형 부재 생산기술의 발달 등으로 여러 선진국에서 다양한 형태의 모뉴멘트적인 건축물이 시도되고 있으며 국내의 경우도 동대문역사문화공원, 부산국제영화센터, 전곡선사유적박물관 등과 같은 건설이 진행되고 있고 다른 실험적인 프로젝트 사례도 발

표되고 있다.

비정형건축물은 건물의 전체 또는 일부가 기존의 사각형 위주에서 벗어나, 기울거나 좁아지거나 뒤틀린 형태이거나 자유로운 곡선 형태를 가지고 있는 건물을 말한다 (김선우 2009). 이러한 비정형 건축물의 건설에서 가장 어려운 공정은 복잡한 디자인으로 이루어진 외장부재를 제작 및 시공하는 것이다. 비정형 건축물의 외피는 NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 라 불리는 이중곡률의 곡면부재를 포함하게 된다. 이러한 형태를 가진 외장부재를 시공하기 위해서는 먼저 복잡한 기하학적 형태의 이중곡률 외피를 제작과 시공이 가능한 형태와 크기로 나누어야 하며 나누어진 외피 패널은 비정형 곡면의 곡률이 클수록 공사비가 증가하기 때문에 복잡한 2방향 곡률을 갖는 곡면이 최소가 되도록 재해석하는 최적화과정을 거쳐야 한다.

\* 일반회원, 서울과학기술대학교 대학원 건축공학과 석사, rosecion@snut.ac.kr

\*\* 일반회원, 서울과학기술대학교 대학원 건축공학과 석사과정, shw7832@snut.ac.kr

\*\*\* 종신회원, 서울과학기술대학교 건축공학과 교수, 공학박사 (교신저자), ockjh@snut.ac.kr

패널최적화는 설계자의 기하학적인 설계의도, 부분 또는 전체 건물형상의 변형 가능정도, 재료의 물성, 제작 및 시공 상의 제약조건, 기하학적 패널생성 알고리즘, 비용 등 여러 요소가 고려되어야 하는 어려운 과정이다. 또한 건물형태에 따라 최적 패널 패턴이 다양할 수 있고 수학적 알고리즘을 전문가별로 각기 다르게 정의할 수 있기 때문에 여러 프로젝트에 규범적으로 적용하고 참조할 수 있는 패널최적화 레퍼런스를 확보하기 어렵다.

국외의 경우는 여러 선행연구자들이 프로젝트 베이스의 경험에 입각하여 다양한 비정형 외피의 패널화와 최적화, 제작 및 시공에 대한 레퍼런스를 제공하고 있으나 국내의 경우는 동대문 역사문화공원 등 몇몇 건축물이 진행되고 있지만 패널최적화에 대한 Know-How는 해외 컨설팅기업이나 학습단계에 있는 국내 일부 BIM 전문기업이 배타적으로 보유하고 있을 뿐 국내 건설산업의 기술력 증진에 기여할 수 있을 만큼 지식공유가 이루어지지 못하고 있으며 패널의 제작 관련 지식 역시 패널형태와 재료에 따라 국내 기술력에 의한 제작가능성이나 제작방법 등을 알기 어려운 실정이다.

본 연구는 비정형 BIM 모델링 도구인 Digital Project (DP)<sup>1)</sup>를 활용하여 비정형 건축물 외피의 패널화 및 최적화 과정을 구현함으로써 BIM 도구를 이용한 적정 패널최적화 프로세스를 도출한다. 또한 패널최적화 결과 추출한 곡률형태별 Mock-Up 패널을 제작하여 국내 현행 기술에 의한 비정형 패널 제작의 문제점을 도출하고 그 개선방향을 제시한다.

## 1.2 연구의 범위 및 방법

국내에서 건축되고 있는 비정형 건축물은 앞에서 언급한 바와 같이 동대문역사문화공원, 전곡선사유적박물관, 킨텍스 제2전시관 등을 들 수 있으나 이들 프로젝트의 비정형 패널최적화에 대한 자료는 공개된 바 없다.

이러한 문제점에 대한 대안으로 본 연구는 비정형 건축외장요소를 많이 포함하고 있는 소규모 주택건축물을 대상으로 연구를 수행하였다. 연구대상 건축물은 연면적 418m<sup>2</sup>, 철골조 2층 주택 건물로, 2007년 수도권에 완공되었으나 최근 박물관으로 리모델링된 건축물이다. 이 건축물의 외관은 그림 1과 같다.

연구대상 건축물은 설계 당시 마야 (Maya) 프로그램을 이용하여 3D 형상모델을 구축하고, 2D 기반의 오토캐드로 실시설계를

진행하였던 관계로 본 연구가 필요로 하는 비정형 외장부재의 3차원 엔지니어링 정보와 곡률, 좌표 값 등을 제공하지 못하였다. 본 연구는 역공학기법(Reverse Engineering)<sup>2)</sup>을 근간으로 BIM 도구 중 하나인 DP를 활용하여 비정형 패널형태를 구축하고 패널최적화 결과를 도출한다.



그림 1. 연구대상 건축물

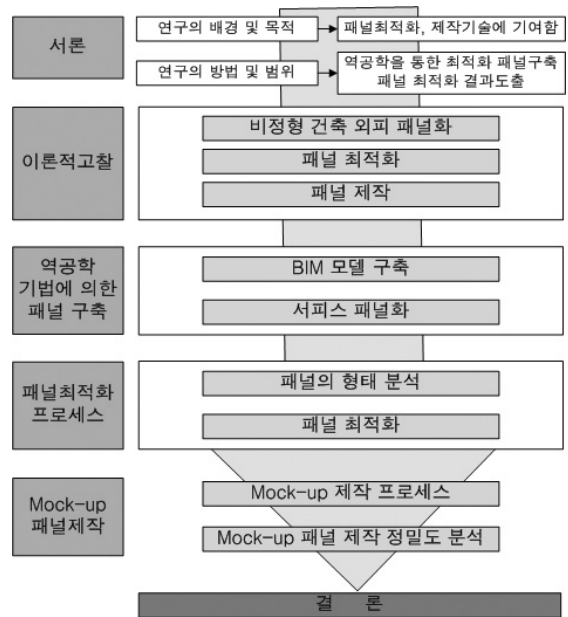


그림 2. 연구의 방법

패널최적화 결과로 도출한 8가지 형태의 패널들 (평판 2개, 일방향 곡률 패널 4개, 이방향 곡률 패널 2개)의 Mock-up 부재를 제작하면서 전문가 4인과 인터뷰를 실시하여 곡면 형태별 패널의 제작 가능성, 제작 시 유의사항, 국내기술의 적용범위, 문제점 등을 분석한다. 레이저 스캐닝 기술을 사용하여 설계한 패

1) DP는 Gehry Technology가 개발한 CATIA기반 소프트웨어 응용 프로그램으로 비정형 건축물 BIM도구로 활용되고 있다. CATIA는 프랑스 다쏘에서 개발한 3차원 CAD 프로그램으로 자동차나 항공기를 설계, 개발하는데 주로 사용되었으나, 1992년 프랭크게리가 Barcelona Fish를 DP를 활용해 설계하면서 비정형 설계에 활발히 사용되게 되었다.

2) Reverse Engineering이란 도면이 존재하지 않은 대상물로부터 형상이나 색상정보를 획득, 2D 또는 3D 도면제작, 모형제작 등을 함으로서 제품 생산 등에 활용하는 일련의 과정을 말한다.

널과 생산된 패널과의 데이터를 비교함으로써 이 방향 곡률 곡면부재의 제작정밀도를 분석한다. 또한 Mock-Up 부재 제작 시 도출된 문제점을 개선하기 위한 외장부재 협업생산프로세스를 제안한다. 본 연구의 방법 및 흐름은 그림 2와 같다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 비정형 건축 외피 패널화

비정형 건축 외피는 대부분 다양한 자유 곡선으로 이루어져 있으며 이러한 자유 곡선은 변화하는 곡률을 가지고 있기 때문에 제작 및 시공하는데 있어 많은 어려움이 있다. 이러한 형태를 가진 외장부재를 시공하기 위해서는 먼저 복잡한 기하학적 형태의 자유곡률 외피를 제작과 시공이 가능한 형태와 크기로 나누어야 하는데 이를 패널화 (Panelization)라 한다 (Les A. Piegl and Wayne Tiller 2002).

패널화는 단순히 외피를 자르는 것이 아니라 시공성, 경제성, 내구·내수성, 미관적 패턴을 가지고 있어야 하며 특히 기계제작의 경우 기계의 제원에 맞는 패널의 크기가 결정되어야 한다. 패널화 방법은 구성하고자 하는 외장의 기하학적인 형태나 설계자의 디자인 의도, 패널생성 알고리즘 등 여러 고려사항에 따라 다르지만 구현하고자 하는 곡면의 종류, 구성되는 패널 패턴의 규칙성 여부에 따라 선행연구에서 연구되었던 패널화 방법을 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 패널화 방법 분류 (김선우 2009)

면의 종류	패턴의 규칙성 여부	패널화 방법	형성된 패널형태 (패널곡률 종류)
불연속면	규칙적인 패턴	삼각패널	삼각형 (평면)
		사각패널	사각형 (평면)
연속면	규칙적인 패턴	오프셋 메시 생성 방법	사각형 (평면, 일방향, 이방향)
		Patch 로직	정다각형 (평면, 일방향, 이방향)
		가전면 생성 방법	사각형 (평면, 일방향, 이방향)
		모자이크화	다각형 (평면, 일방향, 이방향)
	불규칙적인 패턴	하위분할 방법	다각형 (평면, 일방향, 이방향)
		복합적인 패널화 방법	다각형 (평면, 일방향, 이방향)

표 1에서 복합적인 패널화 방법이란 두 가지 이상의 패널화 방법을 복합 적용하는 것을 말하며 일반적으로 미국 조지아대학의 GTPPM (The Georgia Tech Process to Product Modeling)에 따라 다음과 같은 순서로 진행한다: ① 패널화를 위한 기준선 설정; ② 패널줄눈을 생성하기 위한 가로 세로 기준 및 수치결정; ③ 여러 곡률을 갖는 패널선의 생성 및 복잡한 기하학적 형태부분의 처리기준 정립; ④ 생성된 패널의 곡률측정 및 필요에 따라 하위분할하여 최종 패널 생성 (Eastmann 외 2008). 본 논문 제 3 장에서 다루는 연구대상 건축물의 패널화는 이 프로세

스를 따라 수행하며 그 타당성을 검증하도록 한다.

국외의 비정형 건축물 외장부재의 패널화 연구를 살펴보면 바바라와 에밀리 (Barbara & Emily 2007)는 이미지를 분석하여 결과를 얻어내는 이미지 프로세싱을 이용한 리메싱 방법을 제안하였으며 키리안 (Kilian 2006), 셸던 (Sheldon 2002), 게리 (Gehry 1999)는 가전면을 이용하여 평면 삼변형, 사변형, 그리고 육변형과 같은 다양한 형태의 평면다변형 메쉬를 이용한 패널화 방법을 제시하였다. 삼변형 메쉬패널 방법을 이용한 대표적인 사례는 노만 포스터 (Norman Poster)의 브리티쉬 (British) 박물관을 들 수 있으며 다변형 메쉬에 의한 패널화 사례는 그림쇼 (Grimshaw)에 의해 설계된 에덴 프로젝트, 피터 더블류 (PTW Architect)에 의해 설계된 워터큐브 (Water Cube) 등을 들 수 있다.

### 2.2 패널 최적화

비정형 건축에서 설계자는 디자인 의도를 반영한 3D 패널을 생성하게 되는데 초기 패널 모델은 다양하게 변화하는 곡률을 갖는 자유곡선으로 이루어져 있어, 제작 및 시공에 많은 어려움이 있다. 따라서 설계의도와 전체 형상의 변형을 수용할 수 있는 범위 내에서 자유곡선의 수를 줄이고 직선이나 호로 제작할 수 있는 부재의 수를 늘리는 것이 필요한데 이 과정을 최적화 (Optimization)라 한다 (Shelden 2002).

최적화는 어떤 방법 및 기준으로 어느 단계까지 진행하는가에 따라 건물 형태와 시공가능여부, 제작 및 시공비용이 크게 달라진다. 최적화방법에 관한 선행연구를 중심으로 최적화 알고리즘을 정리하면 표 2와 같다. 본 연구의 4장에서 다루는 패널최적화는 연구대상 건축물의 비정형 패널 곡면의 종류와 곡률정도를 고려하여 표 2의 방법 중 적절한 것을 선택하여 수행하도록 한다.

표 2. 패널 최적화 알고리즘

최적화 방법	세부 내용
곡률평균화 알고리즘 (Ahn 1998)	개별 자유곡선의 곡률방향에 따라 양 또는 음의 곡률값을 측정하고 이 값의 평균을 계산하여 블록하거나 오목한 하나의 곡률값을 갖는 호로 변형하는 방법
다중 호 (Multi-Arc)를 이용하는 알고리즘 (Tang and Wang 2001)	두 개 이상의 곡률값을 가지는 자유곡선을 하나의 호로 바꾸는 것이 어려울 경우 두 개 이상의 호로 자유곡선을 바꾸는 방법
하위분할 알고리즘 (Les A and Wayne 2002)	복잡한 자유곡선을 원하는 길이나 반지름 등을 가지는 작은 호나 자유곡선이 되도록 작은 단위로 나누는 것
패널 휨값을 이용하는 알고리즘 (김선우 2009)	자유곡선의 길이 대비 휨값을 비교하여 직선패널로 시공해도 시각적으로 곡면형상을 이루는데 지장이 없는 범위를 측정하는 방법

### 2.3 패널 제작

비정형 외장패널의 제작과정은 마름질을 통한 절단, 형상의 구현을 위한 절곡 및 밴딩, 조립의 순서로 진행된다. 절단은 금속시트를 원하는 사이즈로 자르는 것으로 그 방법에는 전단기, 레이저 커팅, 플리즈마컷팅, 워터젯 커팅이 포함된다.

밴딩 및 포밍의 단계는 작업자의 감각제어에 의한 수작업(작업자가 도면정보에 따라 수동제작)과 자동수치제어에 의한 기계작업(기계적 수치제어에 의한 자동제작)으로 나눌 수 있는데 전자에는 롤러압연기, 절곡기, 유압프레스가 사용되며 수치제어에 의한 기계제작방법에는 하이드로포밍<sup>3)</sup>, 폭발공법<sup>4)</sup>, 무금형 성형<sup>5)</sup>, 멀티플 포인트 포밍공법<sup>6)</sup>이 포함된다.

패널부재 제작을 위한 절단이나 조립은 평판, 일 방향, 이 방향의 곡면 형태에 관계없이 동일한 기술이 적용되나 밴딩과 포밍 공정은 제작되는 패널의 품질확보와 작업용이성 때문에 그림 3에서 보는 바와 같이 일 방향 곡면의 경우는 수작업으로 제작할 수 있으나 이 방향 곡면은 자동기계제작으로 진행하여야 한다(최정민 2010). 최근 외장패널공사를 진행하고 있는 동대문 역사문화공원 프로젝트의 경우는 이 방향 곡률을 갖는 패널제작을 위해 멀티플 포인트 스트레칭 포밍 머신(Multiple Point Stretching Forming Machine)을 해외에서 제작하여 현재 사용하고 있다.

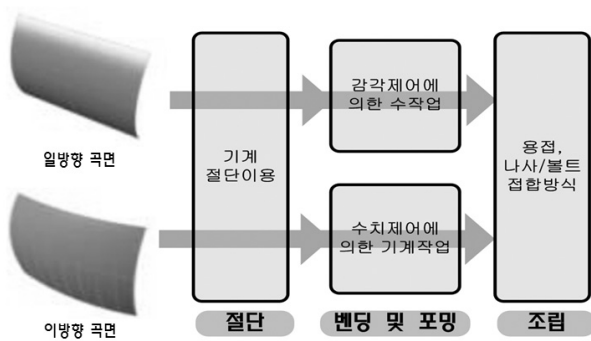


그림 3. 비정형 패널 곡면형태에 따른 제작기술 구분

- 3) 하이드로 포밍(Hydro Forming) : 철이나 폴리아미드 재질 등으로 만든 형틀에 판재를 놓고 수압으로 밀어내서 원하는 형상을 만드는 방식. 반복작업이 가능하기 때문에 자동차의 차체와 같이 곡률이 심하고 여러 번 제작이 가능한 제품에 많이 사용
- 4) 폭발성형(Explosive Forming) : 하이드로 포밍의 일종으로 물속에서 폭약을 터트리 강한 수압을 만들어 성형하는 방법. 금형이 한쪽만 필요하며 타공이 있을 경우 적용이 불가능.
- 5) 무금형 성형(Dieless Forming) : 제작되는 소재는 플레이트(Plate)에 고정이 되고 끝부분이 라운드 처리가 되어 있는 무빙툴(Moving tool)과 테이블이 CNC의 제어를 통해 상호 작용하여 움직이면서 제작을 함.
- 6) 멀티플포스트(Multiple Post) : 작은 프레스가 여러 개 배열되어 아래의 주물모양에 따라 눌러서 형태를 잡는 방식의 가공기계

본 연구는 Mock-Up 부재를 제작하면서 곡면의 형태에 따라 국내에서 일반적으로 적용하고 있는 밴딩과 포밍공정을 활용하도록 한다.

### 3. 역공학기법에 의한 패널 구축

앞에서 언급한 바와 같이 본 연구의 연구대상 건축물은 설계 당시 마야프로그램을 이용하여 3D 형상모델이 구축되었고 2D 기반의 오토캐드로 실시설계가 진행되었던 관계로 본 연구가 필요로 하는 비정형 외장부재의 3차원 엔지니어링 정보와 곡률, 좌표 값 등을 제공하지 못한다. 때문에 연구대상 건물의 패널화를 위해서는 2D 도면으로 설계된 데이터를 3D 모델로 구축하는 것이 필요하며 본 연구에서는 DP를 활용하여 역공학기법으로 3D 모델을 구성하였다.

#### 3.1. BIM 모델 구축

연구대상 건축물의 설계의도를 훼손하지 않고 설계당시의 건축형태를 추출하기 위하여 모델구축 초기 단계부터 설계자의 자문과 크리틱을 반영하였으며 그림 4와 같은 과정으로 역공학 설계를 진행하였다. 그림 5는 3D BIM 모델구축의 세부적인 진행 상황을 설명한다.

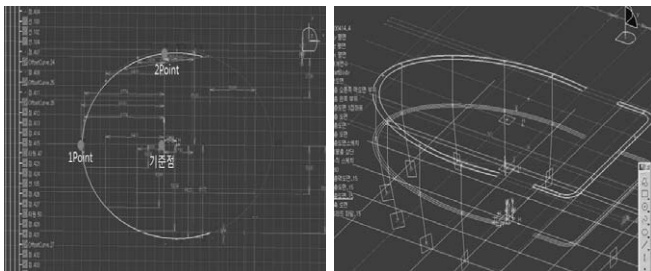


그림 4. 3D BIM 모델 구축

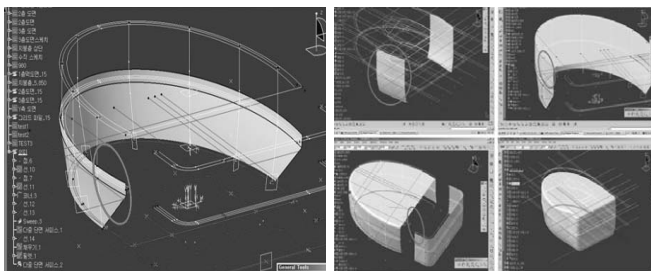
- (1) X, Y 평면에 그리드를 생성하여 3 포인트를 추가하고 타원을 그린 후 중심라인을 생성한다. 이와 같은 방식으로 2층과 3층 옥상 부분에 라인을 생성한다.
- (2) 수직라인을 기준으로 1층, 2층, 3층 수직 서피스를 생성한다. 대상 건축물의 경우 앞부분과 중간부분 뒷부분에 대한 기울기 값이 다르기 때문에 위와 같은 방법으로 나누어서 서피스 모델을 진행하였다. 서피스 부분의 동그라미로 표시되어 있는 부분은 0.5m의 곡률 반지름 값을 갖는데 이 값은 연구대상 건축물의 설계당시 지정된 값이다.
- (3) 생성된 중심라인을 기준으로 등분하여 빔 포인트를 추가한다. (1)과 같은 방법으로 1층, 2층, 3층의 빔 포인트를 추가하고, 각 포인트 마다 평면을 삽입하여 수직라인의 3D 기준좌표의 평면을 잡는다. 이러한 방식으로 각 빔의 선을 생성한다. 생성된 선을 기준으로 0.5m의 곡률 값을 입력

하여 준다. 곡률 값을 기준으로 수직부재를 생성하는데 빔과 빔 사이의 라인을 기준으로 균등한 점을 생성하여 수직부재인 멀리언을 생성하고 수평을 기준으로 철골부재를 완성하게 된다.

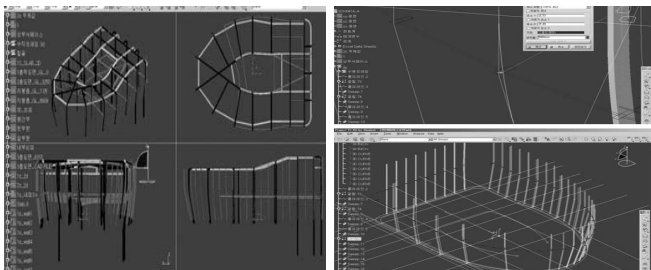
- (4) 각 층 바닥을 기준으로 스케치 작업을 실시하여 라인을 구축하고, 구축된 라인의 벽체에 BIM 속성정보를 가진 객체 라이브러리를 생성한다. 각 개구부 위치에 벽체 및 창호 등 각각의 건물요소를 파라미터로 조절할 수 있는 관계와 규칙들의 집합으로 되어있는 모델 군 또는 건물요소객체로 구성한다.



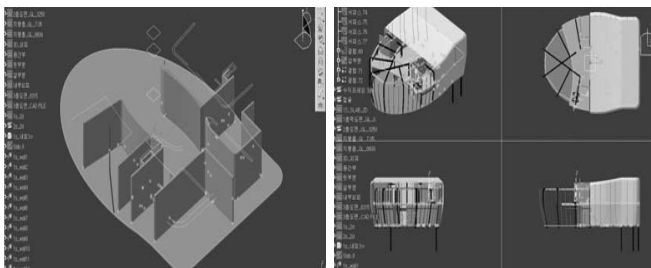
포인트 구축 및 수직 · 수평라인 구축



NURBS 서피스 구축



빔 & 멀리언 생성



벽체 · 개구부 입력

그림 5. BIM 구축단계

### 3.2 서피스 패널화

연구대상 건축물의 외피는 갈바륨이라는 알루미늄, 아연합금 도금 강판부재로 시공되었는데 시공 당시 패널화 과정을 거치지 않고 현장에서 시공자가 외관 형태와 프레임에 맞추어 패널 형태를 제작하고 멀리언에 용접부착한 후 접합부위는 우레탄으로 도장하여 마감하였던 관계로 외장부재 패널화에 대한 정보를 얻을 수 없었다.

본 연구에서 진행한 서피스 패널화는 그림 6과 같은 프로세스로 진행되었으며 그림 7은 세부적인 진행사항을 설명한다. 프로세스를 살펴보면 연구대상 건축물의 패널화는 전반적으로 이론적 고찰부분에서 언급한 GTPPM를 따라 수행됨을 알 수 있다.

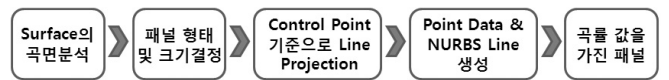
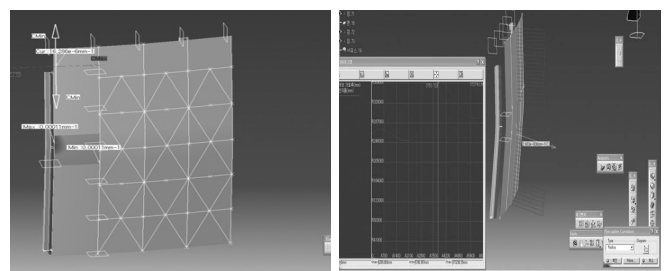
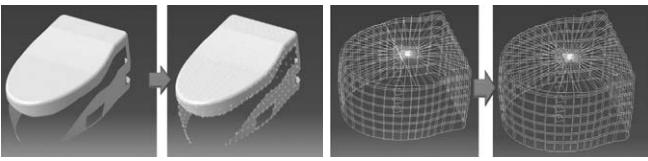


그림 6. 서피스 패널화 프로세스

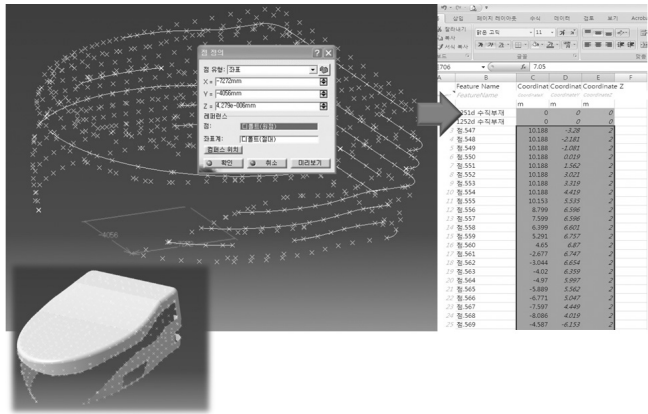
- (1) 패널분할을 위해 그림 7의 ‘서피스의 곡면분석 및 크기형태 결정’ 단계에서 보는 바와 같이 서피스 전체에 대한 곡률분석을 실시하였다. 그 결과 서피스 중간부분의 곡률이 가장 심하여 -10도에서 7도까지 차이가 있는 것으로 나타났다.
- (2) 서피스 분할을 위한 패널형태 및 크기결정에 있어서는 곡률분석결과와 대상건축물 골조프레임의 구성에 따라 다양한 패널형태를 사각형, 삼각형, 평행사변형, 오각형 등으로 구성할 수 있다. 본 연구에서는 멀리언 간격 크기의 정사각형 (1000×1000mm) 형태로 분할하는 방식과 삼각형으로 분할하는 방식을 병행 적용하기로 하였다.
- (3) 위 (2)에서 설정한 패널형태를 대상건축물의 서피스에 투영하기 위해 서피스에 기준점을 설정하고 가로 세로 그리드를 형성하였다. 형성된 그리드 좌표는 비활성 좌표이기 때문에 엑셀을 활용하여 변환이 가능한 포인트 데이터로 변환해야 한다. 변환된 포인트를 중심으로 곡률을 갖는 NURBS 라인을 생성하여 면을 구축한다.
- (4) 위와 같은 과정을 거쳐 NURBS 면을 형성한 후 설계자가 의도하였던 곡률형태를 확보하였는가를 비교분석한다.



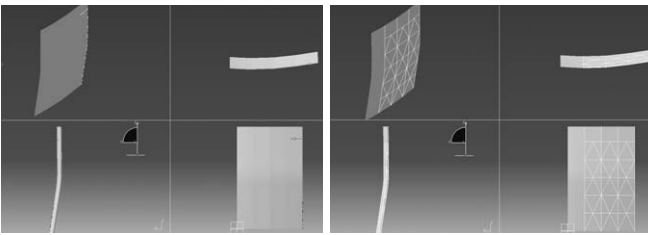
서피스의 곡면분석 및 크기형태 결정



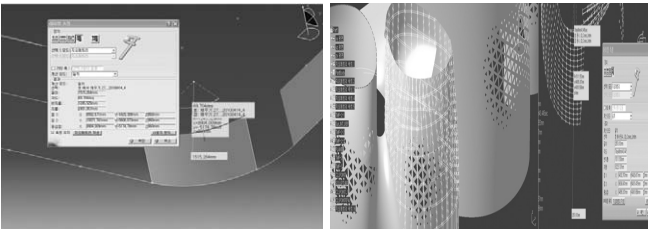
그리드 형성 및 패널 형태 투영



그리드 형성 및 패널 형태 투영



포인트 데이터와 NURBS 라인 생성



패널의 곡률 구축

패널화 작업

그림 7. 서피스 패널화 세부내용

## 4. 패널최적화 프로세스

### 4.1. 패널의 형태 분석

서피스 패널화 결과 연구대상 건축물의 1층과 2층 연결부위, 2층과 옥상 연결부위, 정면부와 후면부에서 곡률이 큰 것을 볼 수 있었다. 외피의 기하학적인 형태를 알기 위하여 패널의 곡률 분석을 진행하였다.

패널은 곡면의 형태에 따라 그림 8에서 보는 바와 같이 곡률이 없는 평판부재, 일 방향 곡면 패널 (곡률 200mm 이하), 일 방향 곡면 패널 (곡률 200mm 이상), 이 방향 곡면 패널의 4가지로 구분하였다.



그림 8. 서피스 최적화 단계에서의 형태분석

패널은 총 553개로, 평판 262개, 일 방향 곡면 패널 (곡률 200mm 이하) 204 개, 이 방향 곡면 패널 (곡률 200mm 이상) 63 개, 이 방향 곡면 패널 24 개로 구성되었다. 이 방향 곡률부재는 대부분 1층과 2층 연결부위, 2층과 옥상 연결부위, 정면부와 후면의 모서리 부위에 위치하고 있는 것으로 분석되었으며 보다 시각적으로 각 곡면별 위치를 파악하기 위해 그림 9와 같이 평판은 빨간색, 일 방향 곡면 값 200mm 이하인 패널은 파란색, 일 방향 곡면 값 200mm 이상인 패널은 노란색, 이 방향 패널은 녹색으로 구분하였다.

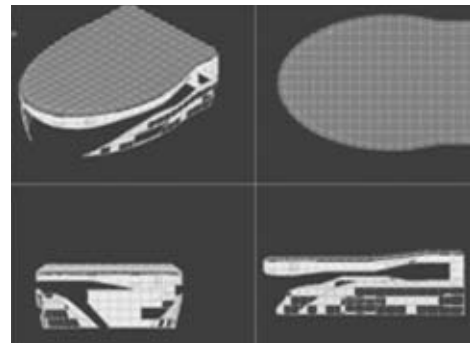


그림 9. 곡률 분석결과에 따른 패널의 시각적 구성

### 4.2. 패널 최적화

패널 최적화 대상 곡면은 24 개의 이 방향 곡면으로, 이론적 고찰에서 언급한 최적화방법 - 곡률 평균화, 하위분할, 다중 호 이용, 패널 휨값 이용 - 중 곡률평균화 방법과 패널 휨값 이용방법을 혼용하여 최적화를 수행하였다. 그림 10은 곡률평균화방법을 적용하여 2 개의 자유곡선을 1 개의 호로 조절하는 모습을 보여주고 있는데 곡률분석을 통해 제어점을 지나는 평균라인 값을 계산하여 생산 가능한 형태로의 라인을 재구축하는 방법을 진행하였다. 패널 휨 값 이용방법은 김선우 (2009)가 호 또는 곡면 패널이 직선 패널로 변경되어도 시각적으로 곡면으로 인지하는 범위 값으로 설정한 1/100 (호의 모서리 길이 대비 휨 값의 비율)을 기준으로 하였다. 이 방법들을 채택한 것은 연구대상 건축물의 비정형 곡면곡률이 비교적 복잡함이 덜한 이 방향 곡면이기 때문에 다중 호를 분석하거나 하위분할이 필요하지 않았기 때문이다.

패널최적화 결과 이 방향 곡면은 없는 것으로 분석되었으며 곡률 200 mm 이상의 일 방향 패널이 6 개 증가한 69 개, 곡률 200 mm 이하의 일 방향 곡면은 18개 증가한 222개로 분석되었다. 그림 11은 최적화 결과 이 방향 패널에서 일 방향 패널로 변환된 부분 (정면의 2층과 옥상 연결부위, 옥상의 측면과 후면 모서리 부위)을 보여준다.

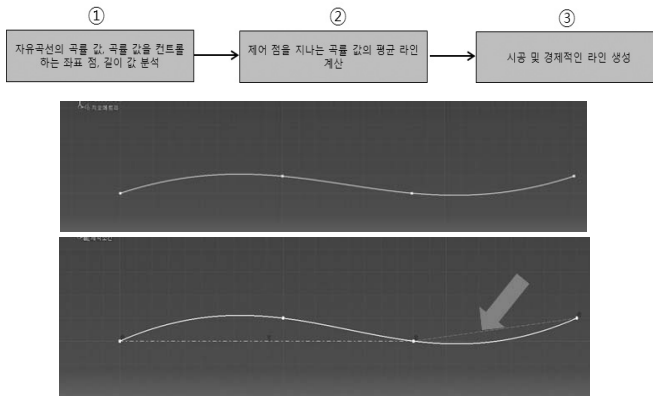


그림 10. 자유곡선의 최적화 라인 변형 사례

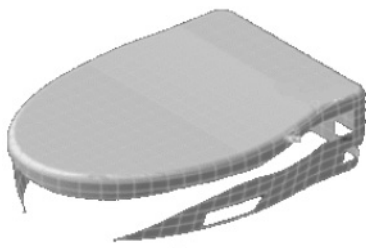


그림 11. 최적화된 패널

## 5. Mock-up 패널 제작

비정형 건축의 건설에 있어 가장 어려운 공정은 패널의 정확한 제작과 시공정밀도를 확보하는 것이다. 해외 프로젝트의 경우는 복잡한 비정형 패널의 제작에 하이드로포밍공법이나 멀티플포스트공법 등 IT 기반 자동화공법을 사용하고 있다 (옥중호 2010). 그러나 국내의 경우는 현재까지 비정형 건축 건설사례가 극히 드문 상황으로, 대단히 고가인 이러한 첨단 장비를 사용하여 복잡한 NURBS 곡면패널을 제작한 사례는 전무한 실정이고 기술자의 수작업에 의한 패널제작도 어떤 형태의 패널까지 가능한지, 제작정밀도는 어느 정도인 지 판단하기 어려운 상황이다.

본 연구는 국내에서 곡면제작 시 많이 사용하고 있는 기술로 패널을 제작할 경우 정밀정도를 측정해 보기 위해 연구대상 건물 패널화 분석결과 도출한 평판, 일 방향 패널, 이 방향 패널을 Mock-up 제작하였다. Mock-up 패널의 재질은 국내에서 비정형 건축에 적용되고 있는 알루미늄과 GFRC (Glass Fiber

Reinforced Concrete)를 선택하였으며 각 재질별로 평판 1장, 일 방향 곡면 패널 2장 (곡률 200 mm 이상/이하 각 1장), 이 방향 곡면 패널 1장 등 총 8장을 800 x 600 mm의 크기로 제작하였다.

Mock-up 패널제작에는 각 재료별로 전문가 2인이 참여하면서 재료별 물성에 따른 제작 시 유의사항, 장비사용법, 서브프레임 제작법, 곡면가공법 등에 대하여 자문하였다.

### 5.1 Mock-up 제작 프로세스

비정형 패널을 제작하기 위해서는 2D 조립 및 전개도면을 추출하여야 한다. 그림 12는 3D Modeling 데이터를 이용한 이 방향 패널의 조립도와 전개도이다. 일 방향 곡면의 경우 곡률값이 하나이기 때문에 곡률값을 정의하고 바로 도면화하면 간단하게 제작도면을 작성할 수 있지만 이 방향 곡면일 경우 곡률값을 분석하여 근사값으로 점과 선 작업을 하여 주어야 하기 때문에 본 연구 시 미리 곡률값의 오차범위를 정하여 실제 제작할 때와 도면상의 오차를 최대한 줄여줄 수 있도록 세심한 작업이 요구되었다.

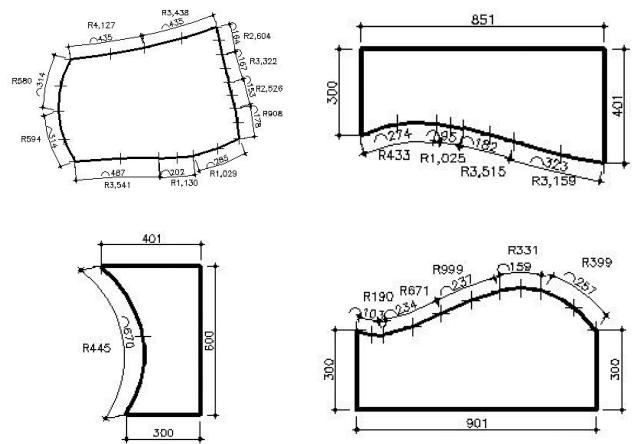


그림 12. Mock-up 부재 제작 전개도 작성

#### 5.1.1 알루미늄 패널 Mock-up 부재 제작

알루미늄패널은 국내에서 곡면 제작 시 가장 많이 사용되는 롤러압연기와 절곡기를 사용하여 제작하였다. 압연은 곡면을 제어하는 롤러와 고정된 롤러 사이에 부재를 밀어 넣어 원하는 곡률을 가진 제품으로 가공하는 방식으로 일 방향 곡률을 가진 부재의 제작에 있어 가장 일반적인 방법이다. 곡면의 반지름 값이 200 - 300 mm 정도이면 6 m까지 제작이 가능하다. 반지름 값이 200 mm 이하이면 절곡기를 이용하는 것이 일반적이다 (J&S 한백 2006).

본 연구에서 알루미늄 Mock-up 제작 시 하이드로포밍공법이나 폭파공법, 무금형 성형, 멀티플 포인트공법 등의 자동수치제어에 의한 기계제작을 수행하지 못한 것은 국내에서 아직까지 비정형 건축외장 부재 제작에 이러한 공법이 활용된 사례가 없고 기계의 확보가 어려웠기 때문이다.

평판과 일 방향 곡면패널을 표현하기 위해서 그림 12의 전개도를 이용하여 서브프레임을 먼저 CNC 기계로 절단하여 네 면을 볼트로 조립하고 그 위에 판 부재를 고정해 형상을 완성하여 작업을 마무리했다. 그림 13은 일 방향 곡면의 제작순서를 보여준다 (좌측 상단부터 시계바늘 방향).

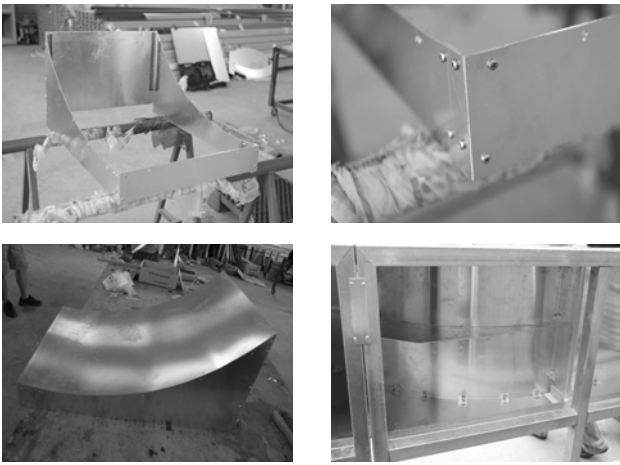


그림 13. 일 방향 알루미늄 Mock-up 곡면의 제작과정

곡면은 평판과 달리 인장력에 의해 지속적으로 곡면이 퍼질 우려가 있으므로 패널 중간부위에 서브프레임을 추가로 설치하였다. 곡면이 안쪽으로 향하는 패널형태는 패널 모서리에서 메인프레임으로 고정하면 변형의 우려가 적지만 곡면이 밖으로 향하는 형태는 이러한 추가 작업이 필요한 것으로 분석되었다.

이 방향 곡면을 가지고 있는 패널 역시 그림 13과 같은 순서로 제작을 진행하였지만 이 방향 곡면을 구축하기 위한 구부림의 힘을 견디지 못하고 알루미늄 패널이 파괴되었다. 작업자의 숙련도와 사용하는 재료에 따라 달라지겠지만 복잡한 이 방향 곡면인 경우 절곡기를 이용하여 수작업으로 제작하는 것은 한계가 있는 것으로 분석되었다.

### 5.1.2 GRFC 패널 Mock-up 제작

GRFC 패널을 제작하기 위해서는 거푸집 제작이 가장 중요하다. 비정형 외장의 경우 정형화된 시스템 거푸집을 사용하는 것이 불가능하기 때문에 별도의 거푸집을 제작하여야 하는데 우선 거푸집을 제작하기 위한 몰드를 만들어야 한다. 몰드는 목재로 만드

는 방법과 스티로폼으로 만드는 방법이 있는데 본 연구는 스티로폼을 사용하였다. 몰드의 제작은 3D 몰드 형상파일을 5축 자동가공 CNC 기계 데이터로 변환하여 입력하면 그림 14와 같이 자동적으로 스티로폼이 가공된다. 몰드를 제작한 후 몰드 위에 콘크리트를 타설하여 GFRC 거푸집을 제작하였다. 그 후 GFRC 재료를 믹싱하여 타설하고 스팀양생으로 8-9시간 양생한 후 탈형 후 원하는 색상으로 2회 도장하여 GFRC 패널을 완성하였다.

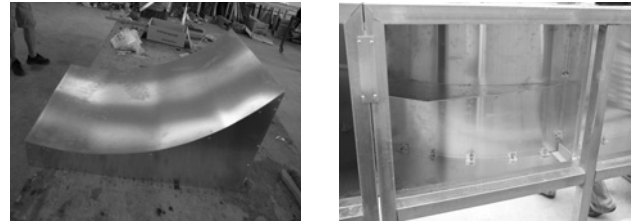


그림 14. GFRC 거푸집 몰드 자동가공 과정

CNC 기계가공은 정확한 결과값을 얻을 수 있지만 가공할 수 있는 크기가 제한적이고 가공시간이 오래 소요되는 단점이 있었다. 따라서 GFRC로 이 방향 곡면을 제작할 때 복잡한 거푸집 제작공정을 줄이고 경제적인 외피생산과 시공을 위해서는 패널 최적화를 통해 면을 단순화시키고 형상의 종류를 다양화하지 않는 계획이 필요한 것으로 분석되었다.

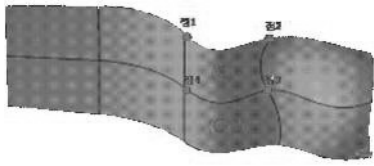
## 5.2 Mock-up 패널 제작정밀도 분석

Mock-up 부재의 3D 모델링 데이터와 제작된 후의 부재제작 정밀도를 비교하기 위해 3D 레이저 스캐닝 기술을 사용하였다. 레이저스캐닝 기술은 대상체에 일정 간격으로 레이저 빔을 주사하여 대상체에서 반사된 빔의 방향과 측정 거리를 이용해 대상체의 외형을 3차원 좌표에 나타내는 방법이다 (박재우 2003).

레이저 스캐닝 기술로 생성된 초기 데이터들은 형상에 대한 위치정보만 가지고 있기 때문에 체적요소를 나타낼 수 없으며 파일의 파라메트릭 변환도 불가능하다. 본 연구에서는 레이저 스캔된 점 데이터를 DP를 이용하여 건축물 외곽라인과 서피스를 구성하고 본 논문 3장의 '서피스 패널화' 처리과정을 거쳐 파라메트릭 정보교환이 가능한 BIM 데이터를 확보하였다.

Mock-up 패널부재의 제작정밀도 비교는 중첩비교기법을 사용하여 실시하였다. 중첩비교기법은 제작되어진 부재를 레이저 스캔한 BIM 형상데이터 (이하 As-Manufactured 라 함)와 설계 BIM 형상데이터 (이하 As-Designed 라 함)를 중첩시켜 비교하여 오차를 측정하는 기법이다.





Feature Name	Area	Coordinate X	Coordinate Y	Coordinate Z
	ft2	mm	mm	mm
Surface C	5,917			
C 점 1		1580	100	1200
C 점 2		830	0	1200
C 점 3		880	0	600
C 점 4		1580	100	600
Surface C-1	5,668			
C-1 점 1		1580	100	580
C-1 점 2		880	0	580
C-1 점 3		780	0	-20
C-1 점 4		1580	100	-20

(a) Mock-Up 부재 As-Designed 모델링 데이터



Feature Name	Area	Coordinate X	Coordinate Y	Coordinate Z
	ft2	mm	mm	mm
Surface C	6,124			
C 점 1		1593	103	1205
C 점 2		880	-3	1197
C 점 3		863	-5	595
C 점 4		1590	102	592
Surface C-1	5,653			
C-1 점 1		1584	101	575
C-1 점 2		876	0	581
C-1 점 3		781	0	-17
C-1 점 4		1577	97	-15

(b) Mock-Up 부재 As-Manufactured 데이터

그림 15. As-Designed 와 As Manufactured 의 비교

그림 15의 (a)는 3D로 모델링된 As-Designed이고 (b)는 As-Manufactured를 보여준다. (b)에서 상부 4면은 알루미늄으로 제작한 부재이며 하부 4면은 GFRC로 제작한 부재이다.

표 3. As-Designed 대비 As-Manufactured 제작오차

위치	X 방향 오차	Y 방향 오차	Z 방향 오차
점1	13 mm	3 mm	5 mm
점2	50 mm	-3 mm	-3 mm
점3	-17 mm	-5 mm	-5 mm
점4	10 mm	2 mm	-8 mm

As-Designed와 As-Manufactured의 패널면적을 비교해 보면 평판과 일 방향 곡면에서는 차이가 없었으나 알루미늄 이 방

향 패널인 (C)에서는 0.2m<sup>2</sup>의 차이가, GFRC 이 방향 패널인 (C-1)에서는 0.015m<sup>2</sup> 차이가 있는 것으로 나타났다. 패널 (C)의 As-Designed와 As-Manufactured의 좌표점을 분석하면 표3과 같이 각 모서리에서 x, y, z축 방향 제작오차 값을 구할 수 있다.

이 제작오차 값을 기반으로 패널 (C)의 점1과 점2 간 As-Designed와 As-Manufactured의 제작오차길이를 측정하면 3.57cm<sup>7)</sup>, 점1과 점3 간 제작오차길이는 3cm<sup>8)</sup>가 된다. 이 길이는 표4와 같이 한국공업규격에서 정하는 알루미늄 패널의 폭 (Width : W) 과 길이 (Length : L) 규격 대비 제작허용오차를 초과하는 값으로, 이러한 제작오차는 결과적으로 여러 패널을 프레임에 고정할 때 계획된 위치보다 뒤틀린 위치에 시공하게 하며, 이러한 뒤틀림은 외장패널을 주 구조프레임이나 서브프레임에 고정할 때 프레임의 장기적인 구조적 강성 때문에 패널과 패널 접합부위 들뜸 현상, 누수현상, 외피구성재료의 탈락현상을 초래하게 된다.

표 4. 알루미늄 패널 제작 시 허용오차 범위

치 수 범 위 (mm)	길이, 폭 (mm)	대각선 (mm)	휨
W, L < 1500	±1,5	±2,0	1m 당 1mm
1500 ≤ W, L < 4000	±2,0	±3,0	

이러한 문제점을 방지하기 위해서는 비정형건축물의 설계 시 패널생산방법과 시공방법, 건물의 주 프레임에 외장부재를 고정하는 방법, 서브프레임의 구성방법 등을 함께 시스템적으로 고려함이 필요하다. 비정형건축물의 설계 및 시공과정은 정형건축과 달리 기하학의 설정과 공유과정에 근본적인 차이점이 있으며 그런 과정에 대한 전반적인 이해에 바탕을 둔 설계와 시공의 협업 없이는 설계의도의 변질, 공기지연, 부실시공, 공사비증가 등의 문제점이 발생하게 된다.

### 5.3 비정형 건축을 위한 협업체계 개선

비정형 건축물의 설계와 시공과정의 협업형태는 건축가의 3차원 모델이 설계계약문서로 활용되면서 설계자가 모델 코디네이터로서의 중추적인 역할을 하며 기하학을 관리하는 방식과 건축가의 3차원 기하학을 시공자가 2차원 도면상의 기하학적 규칙이나 좌표 값으로 변환하여 시공자 책임 하에 모델을 재구축하는 방식으로 나눌 수 있다 (구기홍 2008). 어떤 협업형태이든 비

$$7) \sqrt{(1580-830)^2+(100-0)^2+(1200-1200)^2} = 736.6$$

$$\sqrt{(1593-880)^2+(103+3)^2+(1205-1197)^2} = 720.9$$

$$8) \sqrt{(1580-880)^2+(100-0)^2+(1200-600)^2} = 927.36$$

$$\sqrt{(1593-863)^2+(103+5)^2+(1205-595)^2} = 957.42$$

정형 기하학 통제 관리를 위해 설계자와 시공자, 비정형 외장부재 생산자, 발주자 간 설계단계부터의 협업체계 구축이 중요하며 이 중심에는 비정형 건축의 확산에 기여한 3차원 데이터베이스 중심의 BIM 기술이 자리 잡고 있다.

본 연구는 Mock-up 부재 제작에 참여했던 기업 전문가 4인과 인터뷰를 실시하고 그림16과 같이 국내 건설 환경에 적용할 수 있는 BIM 기반의 비정형 건축 협업프로세스를 제시한다. 해외의 경우는 통합프로젝트조달방식 (Integrated Project Delivery : IPD) 과 같은 협업시스템이 구체화되고 있지만 국내의 경우는 건설관행과 법규적 제한 때문에 어려운 실정인 바 국내 대형 프로젝트가 대부분 설계시공일괄입찰방식으로 발주되는 점을 감안하여 이 방식으로 프로젝트가 조달될 경우 설계자, 시공자, 비정형 외장전문가가 사업초기단계부터 BIM 기반으로 협업을 시도할 수 있는 기본적인 틀을 제공하기 위해 제안하는 것이다.

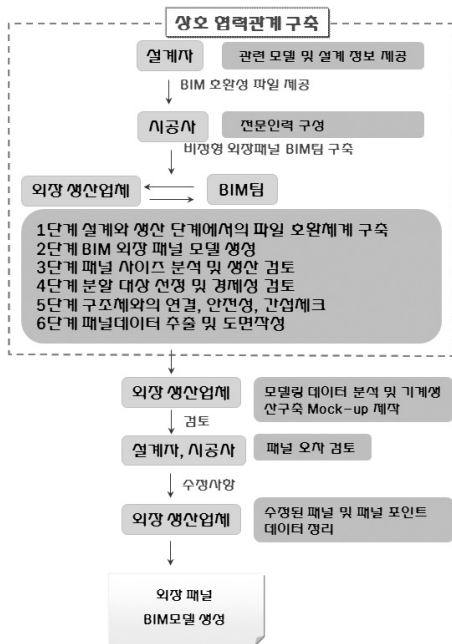


그림 16. 비정형 외장패널 프로세스 제안

## 6. 결론

본 연구는 비정형 요소를 다양하게 포함하고 있는 소규모 주택 건축 사례연구를 통하여 비정형 건축물 외피의 패널최적화 결과를 도출하고 평판, 일 방향, 이 방향 곡면부재의 Mock-up 패널 제작을 통하여 패널종류에 따른 제작 용이성과 시공정밀도를 테스트하고 문제점을 도출함으로써 향후 국내 비정형 건축 외피의 제작기술 개발에 기여할 수 있는 개선방향을 제시코자 하였다.

사례 연구된 건축물은 설계 당시 2D 기반으로 실시설계가 진

행되었던 관계로 역공학기법을 활용, 비정형 BIM 도구인 DP (Digital Project)로 비정형 패널형태를 구축하였으며 패널최적화 결과를 도출하였다. 패널화는 전체 건축물의 외피를 곡면의 형태에 따라 곡률이 없는 평판부재, 일 방향 곡면 패널 부재, 이 방향 곡면 패널 부재로 구분하여 진행하였으며 최적화는 여러 최적화기법 중 곡률평균화 방법과 패널 휨 값 이용방법을 혼용하여 수행하였다. 최적화 기법이 적용 되지 않은 자유곡선은 한 개의 패널에 많은 자유곡선이 존재한다. 이러한 자유곡선을 갖는 이 방향 곡면 패널을 생산이 가능하며 설계자의 설계 의도를 내포한 일 방향 패널로 개수를 줄여 비정형 외장패널의 생산비용을 절감하는 방안으로 진행하여, 이 방향 패널의 개수는 총 24 개에서 최적화 방법을 통하여 0개의 패널로 적용되었다.

Mock-up 부재제작은 국내에서 곡면제작 시 많이 사용하고 있는 기술로 패널을 제작할 경우 제작가능성과 정밀정도를 측정해 보기 위해 평판, 일 방향 패널, 이 방향 패널을 대상으로 실시하였다. Mock-up 전 모델링 데이터 (As-Designed)와 Mock-up 후 제작부재 (As-Manufactured)의 제작정밀도를 비교하기 위해 3D 레이저 스캐닝 기술을 사용하였다. 비교결과, As-Designed와 As-Manufactured의 평판과 일 방향 곡면에서는 차이가 없었으나 이 방향 패널에서는 부재 길이에서 국내 KSD 규준이 정하는 수준 이상의 제작오차를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 제작오차는 여러 패널을 프레임에 고정할 때 계획된 위치보다 뒤틀린 위치에 시공하게 하며, 패널과 패널 접합부위 들뜸 현상, 누수현상, 외피 구성 재료의 탈락현상을 초래하게 된다.

이러한 문제점을 개선하기 위해서는 비정형건축물의 3차원 기하학 BIM 데이터를 설계와 시공단계에서 설계자, 시공자, 파사드 전문생산자가 효과적으로 유지/발전시키는 프로세스 마련이 필요하다. 본 연구는 Mock-up 부재 제작과정에 참여하였던 외장패널부재 생산전문가와 인터뷰를 통하여 국내 프로젝트 조달과정에 적용할 수 있는 협업 프로세스를 제안하였다.

특히 비정형건축물 외장패널의 설계에서는 설계변경과 재작업이 빈번하게 발생하는 상황을 최소화하기 위하여 설계초기 단계에서부터 협력적이고 유지적인 관계를 구축하는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 국내의 비정형 외장패널의 생산기술과 협업체계를 분석하여 설계단계 생산자가 참여한 협업체계를 구축하고 디지털프로세스를 제시하여 외장패널 생산효율화 방안을 모색하였다.

본 연구에서 도출된 결과를 기반으로 향후 보다 많은 데이터를 확보하여 연구를 수행함으로써 비정형 건축물의 패널최적화 기법개발과 패널 제작 정밀도 개선에 괄목할 만한 성과가 있기를 기대한다.

## 참고문헌

- 구기홍 (2008). “3차원 기하학의 효과적인 통제를 위한 설계협업 전략,” 건축, 제52권 제4호, 대한건축학회지, pp.28-31
- 김선우 (2009). “패널제작방법에 따른 비정형 건축물 패널의 분류와 최적화 방법”, 연세대학교 건축공학과 석사학위 논문
- 박재우 (2003). “LASER SCAN으로 제작된 3차원 진단모형의 계측치오차에 대한 연구”, 서울대학교 석사학위 논문
- 옥종호 (2010). “신기술 연구개발 지원 보고서”, 서울과학기술대학교
- 최정민(2010). “비정형건축물 외장패널의 생산효율화를 위한 협업체계구축 연구”, 서울과학기술대학교 주택협동과정 석사학위논문
- J&S 한백 (2006). 서울과학기술대학교 SCEA 1기 강의자료
- Barbara, C., and Emily, W. (2007). “Constrained planar remeshing for architecture.” Proceedings of Graphics Interface 2007, ACM, Montreal, Canada, 11~18.
- Chuck Eastman, Paul Teicholz (2009), “BIM 핸드북(건축주 건축가 엔지니어 그리고 건설인을 위한 BIM 가이드)”, Wiley John & Sons, SPACETIME
- Frank Gehry (1999). “Gehry Talks : Architecture + Process,” Rizzoli International Publications, Inc..
- Gonzalez-Pulido (2002), “Managing the Construction of the Museo Guggenheim Bilbao (B),” Center for Design Informatics, Harvard Design School
- Kilian, A. (2006). “Design exploration through bidirectional modeling of constraints,” Massachusetts Institute of Technology, Boston.
- Les A. Piegl and Wayne Tiller (2002). “Biarc Approximation of NURBS Curves”, Computer-Aided Design, 34, pp. 807~814
- Shelden, D. R. (2002). “Digital Surface Representation and the Constructibility of Gehry’s Architecture,” The Massachusetts Institute of Technology, Boston.
- Xunnian Tang and Guozhao Wang (2001). “Planar Point Set Fairing and Fitting by Arc Splines,” Computer-Aided Design, 33, pp. 35~43
- Young-Joon Ahn, Hong-Oh Kim, and Kyoung-Yong Lee (1998). “G1 Arc Spline Approximation of Quadratic Bezier Curves,” Computer-Aided Design, Vol. 30, No. 8, pp. 615~620

논문제출일: 2011.02.20  
 논문심사일: 2011.02.25  
 심사완료일: 2011.04.20

## Abstract

The most critical issue in free-form buildings is how to construct the free-formed exterior facade panels. Their geometric complexity delivers many cons and problems in fabricating and constructing their shapes. To construct a free-form building, first of all, its skin has to be chopped into small pieces, which is called panelization. After panelization, the panels go through an optimization process to construct them economically. The panel's geometries are modified or regenerated through this optimization process. In this study, the panel optimization process of free-form buildings are performed through a case study. The panel shapes of the case study are modeled with Digital Project. To test the constructability of the various panels, 8 mock-up panels are made and laser scanning technology is applied to measure the preciseness of the panels manufactured in comparison with their original design.

**Keywords :** Panelization, Digital Project, Optimization, Laser Scanning, Mock-up Testing