

디지털 디자인 프로세스에 의한 자유형태적 구조의 구축  
유형에 따른 특성 분석

Characteristics of Digital Tectonics of Free-form Structures designed through Digital  
Process

류호창

건국대학교 디자인조형대학 실내디자인학과 교수

**Lyu Ho-Chang**

Dept. of Interior Design, Konkuk University

이 논문은 2007년도 건국대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 논문임

## 1. 서론

- 1.1 연구 배경
- 1.2 연구 범위 및 방법

## 2. 디지털 건축의 자유형태적 접근

- 2.1 디지털 기술과 건축형태의 변화
- 2.2 공간 구조의 개념적 변화

## 3. 자유형태 구축을 위한 디지털 디자인 프로세스

- 3.1 형태생성을 위한 디지털 프로세스
- 3.2 구축을 위한 디지털 프로세스
- 3.3 부재 생성기술과 물성

## 4. 디지털 프로세스에 의한 구축 유형 및 특성

- 4.1 Sectioning
- 4.2 Tessellating
- 4.3 Folding
- 4.4 Contouring
- 4.5 forming

## 5. 결론

### 참고문헌

### 논문요약

실험적 성격이 강한 디지털 건축에 대한 연구는 지금까지 주로 형태생성에 집중된 반면 실제적 구축성에 대한 논의는 상대적으로 빈약했다. 하지만 최근 디지털 기술의 발전에 따라 구축 사례가 급속하게 확대되고 있어 형태생성에 대한 논의와 함께 실제적 구축술에 대한 연구가 크게 요구되고 있다. 따라서 본 논문에서는 디지털 기술에 따른 건축형태의 변화와 자유형태 구축을 위한 디지털 프로세스의 분석을 통해 구축적 유형과 그 특성을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 디지털 프로세스를 통한 자유형태의 구축은 현장 작업보다는 디지털 사전제작을 통해 현장작업을 최소화하는 방식으로 진행된다. 구축 방식은 크게 외피와 구조부재로 구분되어 생산된 후 현장에서 조립되는 방식과 외피와 구조부재의 구분이 없이 하나로 통합된 모노코크 방식으로 대별된다.

2) 자유형태의 구축 유형을 리사 이와모토(Lisa Iwamoto)가 정리한 sectioning, tessellating, folding, contouring, forming의 5가지를 기준으로 분석해보면,

사전제작된 부재의 결합 공정이 크게 요구되는 sectioning, tessellating, folding 그룹과 결합공정이 최소화된 contouring, forming 그룹으로 대별된다.

3) sectioning과 folding은 가장 구조적 해석과 기능이 크게 부각되는 유형이고, contouring과 forming은 표현적 특성이 더욱 부각되는 유형이다. 각각의 구축 유형은 단일로 적용되기도 하지만 복합적으로 적용됨으로써 자유형태 구축의 완성도가 높아진다.

### 주제어

자유형태, 디지털 프로세스, 디지털 제작

### Abstract

Most researches related to digital architectures have been more focused on formal and stylistic concerns than on practical constructions mainly because of the very limited number of realized construction. But demands for researches linking digital technology and architectural production are more required than before in accordance with advancing digital technology and increasing realization. Thus, study was focused to analyze characteristics of digital tectonics of free-form structures designed through digital processes. The results of the study are as follows;

1) Types of digital fabrications applied to constructing free-form structures - composed of surface-covering members and structural members - are basically accomplished with digital pre-fabrication methods rather than on-site constructions.

2) Lisas Iwamoto's five types of digital fabrications - sectioning, tessellating, folding, contouring, and forming - can be divided into two groups such as an assembling and a monocoque types, based on degree of requirement of connecting procedure on site.

3) 'Sectioning' and 'folding' have more structural strength while 'contouring' and 'forming' are more expressive. Those five types of fabrications can be used solely on its own or in any multiple combinations.

### Keyword

Free-form, digital process, digital fabrication

## 1. 서론

### 1.1 연구 배경

건축에서 나타나는 다양한 형태와 구조는 그 시대의 기술수준을 반영한다. 그런 관점에서 볼 때 건축에서의 디지털화는 작업의 편리성을 위해 시작되었지만 1990년대 이후부터는 창조적 작업을 위한 도구로 사용되기 시작하면서 건축 형태와 구조에 큰 변화를 일으켰다. 즉 디자인 프로세스의 보조적 수단으로서의 재현적 도구의 역할에서 개념의 도출, 형태 구성 및 구축방법과 같은 핵심적 부분까지 그 역할이 넓어지면서 건축디자인의 본질을 변모시키는 상황에 이르렀다.

대부분의 디지털 건축 작품들은 실험적 성격이 강하고 개념적 단계에 머무르는 경우가 많아 건축가들의 사고 영역을 크게 확장시키는 계기는 제공했지만 실제로 구축된 사례가 상대적으로 적었다. 그 이유는 디지털 건축의 자유형태적 구조를 구축하기 위한 기술적 한계와 함께 경제적 타당성을 확보하지 못한 점도 있지만 형태성성에 대한 논의에 비해 실용적 차원의 구축 논의가 불충분한 원인도 있다. 하지만 최근 시공기술의 급속한 발전과 시공을 위한 컴퓨터 활용성의 증대 등에 힘입어 실제적 구현이 확대됨에 따라 디지털 건축은 급속하게 변모하고 있다. 즉 형태생성의 설계과정에서 주로 활용되었던 디지털 미디어가 이제 실체화 과정에 적극적으로 활용되기 시작한 것이다. 지금까지 디지털 건축에 대한 선행 연구에서도 디지털 건축의 개념적 논의 및 형태성성에 대한 분석은 활발히 진행되었으나 실제적 구축성에 관한 연구는 상대적으로 빈약했다. 특히 실내디자인의 관점에서 디지털 프로세스를 이용한 구축술에 대한 연구는 거의 없는 상태이다. 따라서 본 연구에서는 실내디자인 분야에의 적용가능성에 초점을 두고 디지털 프로세스를 이용한 자유형태 구조의 실제적 구축 유형 및 특성에 대해 분석해 보고자 한다.

### 1.2 연구 방법 및 범위

디지털 디자인 프로세스에 따른 자유형태 구조의 구축성을 유형적으로 분석하기 위한 방법은 다음과 같이 구성된다. 첫째, 자유형태 구조의 구축성을 연구하기 위한 선행적 과정으로 디지털 기술의 발전에 따른 건축형태의 변화와 공간구조에 대한 개념적 변화 추이를 살펴본다. 둘째, 자유형태 생성과 구축을 위한 디지털 프로세스의 변화추이와 활용 실태를 살펴해보는데, 이는 형태생성 과정에서 적용되는 프로세

스가 실제적 구축을 위한 프로세스와 연관성이 크다는 전제 아래서 진행된다. 마지막으로 디지털 프로세스를 통한 자유형태적 구조의 실제적 구축 유형을 분류하고, 대표적 사례와 함께 구축유형의 특성을 분석하고자 한다.

근본적으로 '자유형태'는 정형성을 벗어난 모든 형태를 포괄적으로 의미할 수 있어 유기적 구성과 사선적 구성 등을 모두 포함하여 연구한다. 또한 본 연구가 디지털 건축에 대한 일반적 논의보다는 디지털 프로세스를 통한 자유형태 공간의 실제적 구축성에 초점이 맞추어졌으므로 디지털 건축의 개념이나 생성적 사유와 같은 일반적 담론은 가능한 배제하였다.

본문의 이해를 돕기 위해 분석된 사례는 국내외 공간디자인 관련 서적, 전문 잡지 및 웹사이트 등에 1990년대 후반 이후 발표된 작품 중에서 디지털 프로세스를 이용해 실제로 구축된 작품을 중심으로 하였다.

## 2. 디지털 건축의 자유형태적 접근

### 2.1 디지털 기술과 건축형태의 변화

현대 과학 패러다임은 디지털리즘과 후기구조주의의 사고에 의해 표피적인 변화를 가져왔고 이러한 표피적 접근은 공간의 재구성으로 이어졌다. 즉 후기구조주의에서는 기존의 유클리드 기하학의 공간형태에서 좀 더 자유로운 비선형적 형태의 작품들이 많이 만들어지게 되었는데 그 배경에는 디지털 기술의 발전에 크게 힘입었다고 할 수 있다. 즉 현대건축에서 직교하는 좌표공간(Cartesian Grid)내 직선과 평면 요소만으로 사고하던 한계를 벗어나 다양한 디지털 미디어를 이용한 적극적인 곡면 형태가 시도되고 있다. 즉 디지털 기술을 이용하여 비선형적인 형태를 제어함으로써 이를 통해 복잡하고 유기적인 형태들을 창출하게 되었다. 이것은 유클리드 기하학의 한계를 극복하게 해주었고, 더욱 다양하고 극단적인 형태의 건축을 시도하게 되는 촉매역할을 하였다.

이런 자유형태의 대부분은 근본적으로 비정형화된 이중곡면(double curved surface) 구조를 갖는다. 이런 디지털 공간은 외피와 내피의 구분이 없는 모호한 경계로 나타나며, 자유로운 곡선과 곡면을 이용해 자유로운 유기체의 활동성을 표현하면서 연속성과 방향성, 유동성, 자기유사성, 비유클리드적 기하체계 등의 특징을 보여준다.

### 2.2 공간 구조의 개념적 변화

건축가의 자유로운 조형의지나 구조적인 동기, 시대정신에 의해 발현된 곡면형상은 그 시대의 생산방식이나 기술수준을 반영한다고 한다. 건축역사적으로 볼 때, 고전건축에서부터 최근 디지털 건축이 도입되기 전까지는 형태가 구조에 종속되는 상황이었지만, 디지털 기술의 발전에 따라 비정형적인 구축부재 생성기술이 발달함으로써 구조가 형태에 종속되는 상황으로 변했다. 결과적으로 구조와 외장재의 형태가 밀접해지는 경향을 보이고, 보나 기둥과 같은 구조부재의 구분이 불명확해짐으로써 건축을 전통적인 구조요소로 정의하는 것이 불가능해졌다. 이것은 구조적 형태에서 자유형태로의 전환을 의미하고, 외피의 비중이 증대되는 경향을 보이게 된다.

디지털 건축에서 보여지는 구조와 외피의 관계는 크게 3가지 방식으로 정리된다. 면 분할에 의해 패턴화된 외피 패널들을 외피 내부에 위치하는 구조체를 이용해 지지하는 방식, 면 분할된 패널과 패널 사이에 구조적인 역할을 하는 프레임을 위치시켜 패널들을 고정함으로써 구조를 외피의 구성요소로 취급하는 방식, 그리고 디지털 거푸집 기술을 이용하여 성형틀을 만든 후 유동성 재료를 이용해 구조와 외피를 일체화시키는 방식이 있다.<sup>1)</sup>

### 3. 자유형태 구축을 위한 디지털 디자인 프로세스

단순히 수작업을 전산화하는 것에서부터 시작되었던 컴퓨터는 사고를 위한 도구로 발전하여 건축의 형태도출 작업을 위한 용도로 확대되었다. 특히 1990년대 이후부터 적극적으로 모색되어온 디지털 디자인 프로세스에 의한 창의적 사고와 디지털 매체와의 결합은 향후 공간디자인 분야의 무한한 가능성을 예측하게 해주었는데, 이런 디지털 테크놀러지에 의한 디지털 건축은 세 단계로 정리된다. 첫 단계는 다양한 요소들이 건축가의 주관에 의해 선택되어 디지털이 되는 단계, 두 번째 단계에서는 형태생성과 형태변형의 프로세스가 이루어지는 단계, 세 번째 단계는 실제적인 물리적 구축과 가상의 구축 두 가지로 수렴되는 구축적 프로세스 단계이다.<sup>2)</sup> 본 연구에서는 형태생성을 위한 디지털 프로세스와 물리적 구축을 위한 디지털 프로세스로 나누어 분석한다.

#### 3.1 형태생성을 위한 디지털 프로세스

- 1) 이상필, 전영훈, 최윤경, 디지털 기술의 구축성에 관한 연구, 대한건축학회논문집 계획계 23권 8호, 2007. 8, p. 137.
- 2) 김동준, 정재욱, 프랭크 게리와 피터 아이젠만의 건축 디자인 프로세스에서 디지털 미디어의 적용방법과 특성에 관한 비교 연구, 대한건축학회논문집 계획계 20권 11호(통권 193호), 2004. 11, p. 212.

초기 디지털 디자인 프로세스는 순전히 형상표현(geometric representation)에 대한 연구를 중심으로 한 형상 모델링(geometric modeling)을 시작으로 하여 현재는 폴리곤 기반 또는 NURBS<sup>3)</sup> 기반의 3차원 표현이 대부분의 모델링 응용 프로그램의 근간을 이루고 있다.<sup>4)</sup> 최근의 형태생성과 변형의 단계는 유연성에 의존하는 자유형태적 경향을 보이기도 한다. 즉 창조적인 과정의 톨로서의 디지털 모델링 프로세스는 형태가 미리 예상되어지지 않고 프로세스를 통해서 구체화되는 경우가 많다. 이는 전통적인 모델링 작업을 통한 형태보다는 모델링 소프트웨어가 제공하는 알고리즘에 디자이너가 동참하는 성격이 강하게 된다. 이와 같은 형태 생성을 위한 디지털 디자인 프로세스는 데이터화된 정보에 의한 '매개변수를 이용하는 디자인 방식(parametric design)'과 인터랙티브하게 진행되는 '실시간 상호반응에 의한 디자인 방식(real-time design)'으로 구분되지만 대부분의 경우 두 방식이 혼합된 프로세스가 적용된다. '매개변수를 이용하는 방식'이 형태성성을 위해 컴퓨터를 적극적으로 개입시키는 디자인 프로세스라면, '실시간 상호반응에 의한 방식'은 형태 디자인을 구체적으로 시각화하는 작업을 효율적이며 동시에 가능하게 하며 디지털 공간에서 체험 가능하게 하는 디지털 프로세스를 지칭한다.<sup>5)</sup>

CATIA<sup>6)</sup> 시스템의 3차원 모델링 프로그램을 형태 도출작업은 물론 구조계산 등 전 과정에 처음 도입한 선구자적 역할을 한 게리(Frank Gehry)<sup>7)</sup>는 건

3) [http://en.wikipedia.org/wiki/Nonuniform\\_rational\\_B-spline](http://en.wikipedia.org/wiki/Nonuniform_rational_B-spline), NURBS는 Non-Uniform Rational B-spline의 약어로서 일반적인 mesh나 polygon 방식으로는 제작하기 힘든 복잡한 곡면을 정확하게 만들기 위해 좌표 개념을 사용하지 않고, control point, order, knot vector라는 세 가지 요소로 이루어진 곡면으로서, 자동차, 선박이나 비행기 제작 등에서 부드러운 곡면을 만들기 위해서 활용되기도 한다.

4) 김성아, 서기영, 최 윤, '프로세스 가능성'으로 정의된 디지털 건축의 구현 및 활용방법에 관한 기초적 연구, 대한건축학회논문집 계획계 19권 12호(통권 182호), 2003. 12, p. 140.

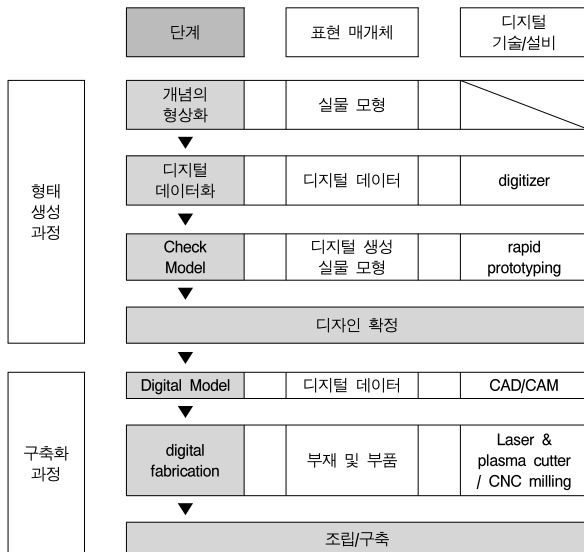
5) 강 훈, 디지털 디자인 프로세스로 본 다이어그램에 관한 연구, 한국실내디자인학회논문집 15권 3호(통권56호), 2006. 6, pp. 202~203.

6) CATIA(Computer Aided Three Dimensional Interactive Application): 프랑스의 Dassault Systemes 회사에서 개발한 프로그램으로 Solid Modelig을 기반으로 3차원 형상을 생성할 수 있고, 3차원 데이터로부터 2차원 도면정보로 추출이 가능한 프로그램이다. 수치제어를 기반으로 복잡한 3차원 곡면을 여러 방향 방정식으로 정의하여 곡면상의 특정 지점에 대한 정확한 위치정보를 제공할 수 있다. 건축 프로세스에 적용될 경우 소수점 7자리까지의 정밀도를 나타낼 수 있는 프로그램으로 비행기와 자동차 디자인에도 활용되고 있다.

7) 항공기술에 사용되었던 디지털 테크놀러지를 적극적으로 건축에 도입하여 전통적인 설계방식으로는 불가능했던 형태를

축을 하나의 오브제로 형상화하기 위해 기존의 2차원적 평면을 통한 3차원적 건축을 구상하는 것과 달리 3차원적 사고로 3차원적 건축을 형상화한다. 즉 초기 스케치과정을 통해 얻은 초안을 전통적인 모델 작업을 통해 모형으로 만든 후, 그것을 건축형태로 구체화하기 위해 3D 스캔을 통해 디지털 정보로 전환하여 공간적, 구조적, 경제적 문제와 시공상의 문제점을 해결하기 위한 수정을 가한 후, 다시 신속조형기술(Rapid Prototyping)장치들을 이용하여 물리적 모델을 다시 만들어 검토하는 역공학(Reverse Engineering) 과정을 반복하여 최종 형태를 결정한다.8) 이런 과정을 통해 최종 완성된 3차원 계획안은 컴퓨터를 이용해 자동으로 2차원적 평면, 단면, 입면 등의 도면으로 전환된다.

[표 1] 형태생성 및 구축을 위한 역공학 프로세스



### 3.2 구축을 위한 디지털 프로세스

초기 디지털 건축이 형태생성 논리를 중심으로 전개되었지만 2000년 초에 접어들면서 형태생성논리로서의 디지털 미디어는 생산방식의 변화를 전제로 한 시공 제어의 논리로 이동되고 있다.9) 즉 디지털 프로세스의 도입으로 형태 생성 프로세스의 변혁뿐만 아니라 건축의 실행과정 또한 새롭게 구축되고

실현가능하게 함으로써 디지털 건축의 새로운 장을 연 건축가이다. 디자인 사고의 도구로 디지털 기반의 설계 프로세스를 이용하여 수작업으로는 도출이 거의 불가능한 이중곡선적인 자유형태를 도출하고, 첨단 디지털 테크놀러지를 자체생산을 포함한 시공제어수단으로 활용함으로써 곡면형상의 구축적 난제를 해결하고 있다.

8) 이상필, 전영훈, 최윤경, 전계서, p. 139.

9) 박정대, 구축과 관련된 디지털 기법의 특성에 관한 연구, 대한건축학회논문집 계획계 21권 12호, 2005. 12, p.185.

있어 이제는 구축을 위한 기술적 영역으로까지 확대되고 있다.

외곽선 모델(edge model)은 형태생성을 위한 디자인 단계를 거쳐 최종적으로 완성된 점들로 이루어진 곡선의 집합이다. 이런 디지털 데이터 상태의 '디지털 생성모델(check Model)'은 CAD/CAM 프로그

램 등을 이용하여 정교한 면처리 과정을 거쳐 '디지털 모델'로 전환된다. 이렇게 구축된 데이터는 자동 CNC 밀링머신 등을 통해 이중곡면 형태의 다양한 부재 및 부품을 제작할 수 있게 된다. 이런 디지털 제작기술은 부재를 직접 가공제작하는 작업이나 특정 형태의 부재를 생산하기 위한 거푸집(form) 작업에 모두 적용된다. 디지털 거푸집의 경우는 곡면의 곡률도가 일반적인 건축부재의 성형범위를 넘어서는 매우 복잡한 형상에 대해서 부분적으로 적용된다.

실제 건축물에 디지털 곡면재현이 적용된 초기 작품은 ING Bank & NNH Head Office(그림 1)에 설치된 'Blob'형상의 대회의실로서 CAD에서 3차원으로 생성된 모델링 데이터를 구축부재를 제작할 수 있는 디지털 모델로 활용한 최초의 사례이다. 하지만 당시 기술수준의 한계로 인한 곡면유리의 부정확한 곡률은 현장에서 목재프레임의 반복적 수정이 요구되었다고 한다.10)



[그림 1] Erick van Egeraat, ING Bank & NNH Head Office (Budapest, 1997)

하지만 그후 B. Fanken & ABB ARchitekten에 의해 설계된 BMW-Pavillion(Frankfurt, 1999)은 구조체와 투명스킨 모두 디지털 제작기법에 의해 사전 제작되어 완성되었다는 점에서 의미가 있다.11)

게리(F. Gehry)는 즉 기존의 수작업 건축방법으로는 형상화가 거의 불가능했던 조소적인 모형을 만들고 이를 건축형태로 구체화하기 위해 3차원 디지털 데이터를 활용하여 디지털 정보로 전환한다. 이렇게 디지털 과정으로 완성된 3차원 계획안으로 다양한 공간적, 구조적 문제를 해결하고, 최종 완성된 3차원 계획안을 컴퓨터를 이용해 자동으로 2차원적 평면, 단면, 입면 등의 도면으로 전환한다.12) 일례로, 구겐하임 미술관(Guggenheim Museum, Bilbao, 1997)에서는 고도의 면분할 기술을 이용하여 티타늄 판재로

10) 위의 책, pp. 188~189.

11) 류창수, 전계서, pp. 120~121.

12) 김동준, 정재욱, 전계서, p. 215

자유곡면을 구현하고 있는데, 이런 외관을 설계하기 위해 CATIA 프로그램을 사용하여 50,000여 장의 도면과 60,000여 시간의 컴퓨팅 작업이 진행되었다고 한다.<sup>13)</sup> 이 작품도 초기에는 스케치와 실제 모델 제작을 통해 시작되었지만 나중에 컴퓨터와 3차원 모델링 프로그램을 이용해서 외부 피복재(cladding) 요소와 구조들의 간격 등의 구체적인 치수들이 결정되었다.

### 3.3 부재 생성기술과 물성

이전에는 물리적으로 구축이 불가능했던 가상공간에서의 비선형적인 자유형태 모델들도 디지털 매체의 발달과 시공능력과 재료의 발전에 따라 실제공간에서의 구축이 가능해지고 있다. 특히 비선형적 자유형태는 디지털 제작(Digital Fabrication)<sup>14)</sup> 기법을 동원하여 표준화 또는 모듈화하기 힘든 건축부재들을 맞춤형생산하는 방식이 저비용으로 가능해짐으로써 더욱 다양하고 복잡한 자유형태의 실제적 구축이 현실화되고 있는 것이다.

자유형태의 구현은 디지털 프로세스를 거쳐서 생성된 곡면을 모델링 프로그램을 사용하여 실제 구축을 위한 곡면으로 재해석하는 과정이 필수적으로 요구되는데, 이런 재해석 과정은 디자인 단계에서 형성된 곡면의 형태적 특성과 곡면을 구축하려는 재료의 특성에 따라 매우 다른 기법들이 요구된다.<sup>15)</sup> 이런 비선형적 디지털 건축을 구축하기 위해서는 건축부재의 맞춤형 생산이 요구되고, 이를 위해서는 디지털 가상모델로부터 건축부재의 생산정보를 얻는 구축부재 생산기술이 필요하게 된다.

디지털 건축의 구축부재 생산 기술은 크게 면 분할과 구조 파생과정으로 구분된다. 면 분할은 가우시안 분석(Gaussian Analysis)을 기초로 곡률에 따라 외피를 분할하는 과정이다. 이것은 디지털 건축가에 의해 생성된 디지털 가상모델은 연속적인 면을 가졌지만, 실제적인 구축에서는 재료의 생산 및 구조적 한계에 의해 연속적인 면으로 이루어질 수 없기 때문에 필요하다. 두 번째 구조 파생기술은 구조형태 정보를 디지털 모델로부터 추출하고 이것을 구조계산 프로그램과 연동하여 구조체를 확정하는 기술이다.<sup>16)</sup> 이런 과정을 거쳐 완성된 최종 데이터는 레이저 절단기, CNC 라우터, 워터젯(water-jet) 절단기,

플라즈마 절단기 등 디지털화된 공작 기계를 통해 다양한 재료의 부재로 가공되거나, 주형이 만들어진 후 그 주형을 사용해 건축부재를 2차 가공하게 되고, 현장에서는 부재들의 조립과정이 주로 이루어지게 된다.

## 4. 디지털 프로세스에 의한 구축 유형 및 특성

디지털 프로세스를 이용한 자유형태적 공간의 구축성에 대한 연구는 지금까지 크게 활성화되지 못했으나 최근 다양한 관점에서 구축에 대한 유형적 연구가 시도되고 있다.(표 2 참조)

[표 2] 디지털 건축의 구축시스템 분류

연구자	구축시스템 분류	분석기준
박정대 (2005)	- 디지털 성형방식 - 디지털 거푸집 방식	부재 생산방식
김동준/ 정재욱 (2007)	- 철골트러스 구조 - 리브 구조 - 곡면트러스/벽 구조 - 포탈프레임 구조 - 곡면셀 구조 - 모노코크 구조	구조시스템
이상필/ 전영훈/ 최윤경 (2007)	- 내부의 구조체에 의해 지지되는 외피 패널 방식 - 패널과 패널 사이에 구조프레임이 위치하는 방식 - 디지털 성형틀을 사용하여 구조와 외피가 일체화된 방식	구조와 외피와의 관계성
Lisa Iwamoto (2009)	- sectioning - tessellating - folding - contouring - forming	디지털 제작 및 구축방식

연구 결과들은 상호 공유되는 공통된 분류기준도 있지만 지나치게 건축외피 중심으로 분석되었거나 최근의 다양한 시도를 모두 포함하기에 한계가 있는 분석기준도 있다고 판단되었다. 그 중에서 이와모토(Lisa Iwamoto)가 자유형태적 공간 구축을 위한 디지털 제작기법을 5가지 유형<sup>17)</sup> - sectioning, tessellating, folding, contouring, forming - 으로 분석한 내용은 디지털 건축을 구성하는 부재의 생산적 관점에서 분석하고 있으나 실제적으로 구조와 표피의 구축을 함께 다룸으로써 디지털 프로세스를 이용한 실용적 구축술을 모두 수용하고 있다고 판단되고, 건축부재의 생산적 관점에서 분석이 이루어짐으로써 스케일상 실내디자인 분야에 적용하기에 더 적합하

13) 상계서, p. 214

14) 디지털 미디어를 이용하여 공장에서 대량 맞춤형 생산방식으로 부재를 미리 제작하고 현장에서는 조립 공정만을 주로 진행한다는 의미에서 디지털 사전제작(Digital Prefabrication)이라고 표현되기도 한다.

15) 류창수, 전계서, p. 120.

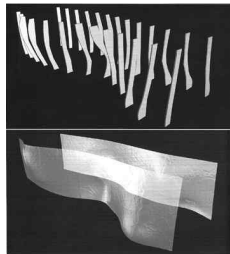
16) 이상필, 전영훈, 최윤경, 전계서, p. 136.

17) 이와모토가 정리한 5가지 유형은 대부분 건축분야에서 영어식 발음을 그대로 사용하는 경우가 많고, 무리하게 번역할 경우 원래의 어의를 정확히 전달하기에 어려움이 있어 본 논문에서는 원어를 그대로 사용하였으나 추후 정확한 표현을 모색할 필요가 있다.

다고 판단되었다. 따라서 실내공간적 관점에서 분석하고자 하는 본 연구의 취지와도 상통한다고 판단되어 본 연구의 분석 기준으로 하였으며, 그 특성들을 사례와 함께 분석하였다.

#### 4.1 Sectioning

컴퓨터 모델링에 있어서 단면(section)이라는 것은 단순히 2차원적인 도면의 의미를 넘어서서 3차원 물체를 절단하는 일련의 프로세스를 의미한다. 즉 이중곡면의 복잡한 자유형태의 공간을 설계하는 경우, 외곽선을 직접 그리는 것보다는 그 공간을 일정한 간격으로 절단하여 일련의 연속된 단면을 생성하는 sectioning과정을 통해 표피와 함께 지지구조를 표현하는 것이 계획안을 이해하고 추후 그 계획을 실제로 구축하기에 훨씬 효과적인 방법이다. sectioning 구축유형에는 단면 늑재(sectional ribbing) 구조, 수평적 적층(parallel stacking) 구조, 와플그리드(waffle-grid) 구조가 포함된다.<sup>18)</sup>



[그림 2] Greg Lynn, Uniserve Co. Headquarter (LA, 2002)



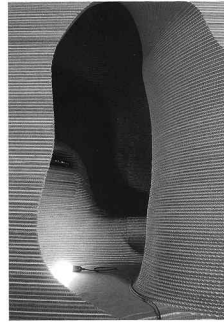
[그림 3] Frankent Architekten, BMW Dynaform (Frankfurt, 2001)

단면 늑재 구조는 구조용 늑재(ribs)와 늑재 사이를 덮는 표피재로 구성된다.<sup>19)</sup> 이런 방법은 이미 항공분야와 조선분야에서 이중곡면구조를 만들기 위해 사용되었다. 린(Greg Lynn)은 이런 연속된 일련의 단면 구조를 디지털 디자인 프로세스에 적용한 대표적인 건축가이다. 유니서브 본사의 회의실을 플라스틱 판재로 감싸고 있는 구조물은 전형적인 늑재와 표피재로 구성된 사례의 하나이다. (그림 2)

BMW Dynaform(그림 3)은 MAYA 프로그램에서 생성된 디지털 모델을 이용하여 장변 방향의 단면상으로 2차원 형상을 추출하고, CNC 밀링머신으로 사전제작된 30,000여 개의 개별부재를 현장조립하여 박스형 철골보를 제작함으로써 외피와 일치하는 구조체를 완성하였다.<sup>20)</sup>

18) Lisa Iwamoto, Digital Fabrications, Princeton Architectural Press, New York, 2009, p. 12.

19) 곡선의 늑재와 늑재 사이를 덮는 표피재의 형태를 결정하는 방법을 'lofting'이라고 하는데 이 용어는 디지털 프로그램에서도 유사한 의미로 사용된다.



[그림 4] Martti Kalliala, Mafoombey (2005)



[그림 5] Alvaro Siza, Serpentine Gallery Pavillion (London, 2005)



[그림 6] Toyo Ito, Serpentine Gallery Pavillion (London, 2002)

수평적 적층구조는 일반적으로 외표면적 형태의 변화에 따라 단면의 적층수가 변형되며, 재료 단면의 시각적 연속성에 의해 구조적 형태와 재료의 구축적 관계가 명료하게 보인다. 헬싱키미술대학교의 공모전에서 수상한 작품 'Mafoombey'(그림 4)는 디지털 프로세스를 이용한 적층식 구조의 특징을 극명하게 보여주고 있다.

와플그리드 구조는 건축사적으로 볼 때 역사가 깊지만 디지털 프로세스를 이용해 더욱 자유로운 형태를 정교하게 구축하게 된 것은 최근의 일이다. 기본적으로 2조의 평행하는 단면들이 서로 직교하도록 결합되면 와플그리드 구조가 만들어지지만 자유형태를 효율적으로 구축하는 것은 디지털 기술이 필수적이다.

알바로 시자(Alvaro Siza)는 'Serpentine Gallery Pavillion 2005'(그림 5)에서 표준적인 와플그리드 구조의 뒤틀린 변형을 통해 자유형태를 구축<sup>21)</sup>하고 있고, 토요 이토(Toyo Ito)는 디지털 프로세스를 통해 와플그리드 구조의 다축적 변형을

'Serpentine Gallery Pavillion 2002'(그림 6)에서 보여주고 있다.

#### 4.2 Tessellating

tessellation은 기하학적 형태를 틈이나 포개짐이 없이 인접시켜 커다란 평면이나 공간을 도형으로 완벽하게 덮는 것을 지칭한다. 표면의 기하체계에 따라 세분화된 표피로 구성되는데, 건축사적으로는 고대 로마시대나 비잔틴 양식의 모자이크, 이슬람 건축의 장식벽, 고딕 성당의 스테인드글래스 등이 대표적인

20) 이효진, 디지털 기술 도입에 따른 건축표피의 구축적 의미에 대한 연구, 세종대 석론, 2008, P. 26.

21) 비표준적인 박판 트러스(nonstandard lamella truss)구조로 변형된 와플그리드는 컴퓨터를 이용하여 427개의 목재 부재들은 각기 다른 단면형태로 설계된 후 5축형 CNC 밀링머신을 이용해 가공되어 현장에서 장부축이음 방식으로 결합되었다.

사례이고, 디지털 개념에서는 mesh 패턴으로 정의된다.

건축가들이 표준화된 판상 재료를 이용하여 대형의 복합적 형태와 표피를 구축하려는 시도가 증가함에 따라 tessellation에 대한 관심도 커지고 있다. 더욱이 유연한 디지털 제작기술을 이용해 다양한 크기와 형태의 비표준화된 부재의 생산 또한 경제적으로 가능해지고 다양한 변화와 조율이 가능해짐으로써 공간디자인 분야에서 tessellation의 응용이 크게 증대하고 있는 것이다.

3차원적인 형태를 디지털 형식으로 설계하는 대표적인 기법인 NURBS와 mesh 방식이 직접적으로 연관되며, 곡면 형상을 2차원 다각형(주로 삼각형) 모듈로 치환하는 방식(triangulation)과 곡면의 좌표 체계를 직접적으로 따르는 방식(extraction of isoparm)으로 분류된다.<sup>22)</sup>

동일한 작품의 설계에 있어서도 디자인 프로세스의 단계에 따라 위의 두 가지 방식이 모두 사용되기도 하는데, 2차원 삼각형 모듈로 치환하는 방식은 다각형과 그것을 세분화시키는 방법을 통해 매끄러운 표피를 생성한다. 일반적으로 polygonal mesh는 삼각형과 사변형이 가장 많이 사용되며, 원하는 곡률에 접근하기 위해 세분화된 표피는 더욱 복잡한 알고리즘이 적용된다. 이렇게 만들어진 polygonal mesh가 곧 tessellation이 된다. 이런 방식은 직교하지 않는 형태를 만들거나 단계적으로 변하는 표피를 구축하기 위해 주로 사용된다. 정교한 곡선을 표현하기 위해서는 더 작고 많은 폴리곤이 필요하게 된다. 일례로 Coop Himmelblau의 BMW Welt(그림 7)의 일명 'double cone'은 디지털 프로세스를 이용하여 스케일과 형태가 모두 다른 패널들로 넓은 표피를 구축하였는데, 지붕의 구조격자들에 의해 결정된 각 패널은 대각선을 중심으로 접혀 두 개의 삼각형으로 만들어지면서 전체적인 형태에 맞추어짐으로써 부드럽고 역동적인 표피를 형성하고 있다. Office dArk의 'Helios House'(그림 8)는 철구조물 위에 1,653개의 삼각형 스테인리



[그림 7] Coop Himmelblau, BMW Welt(Munich, 2007)



[그림 8] Office dArk, Helios House (L.A. 2007)

22) 손창현, 디지털 건축에서 표면의 유연화와 구축성에 관한 연구, 서울 시립대 석론, 2005, pp. 40~41.

스틸판이 표피를 구성하고 있는데, 사전제작 및 조립 공정을 거쳐 운송 가능한 52개의 구조물로 만들어진 후 현장에서는 4주 만에 모두 시공되었다. 디지털 프로세스를 통한 대량 맞춤형생산방식의 효율성과 정밀성을 개척한 대표적인 사례이다.

곡면의 좌표체계를 직접적으로 따르는 방식은 구조체에 의해 형상이 지지되는 것이 아니고 표면 전체가 연속적 구조체의 역할을 한다. 이 방식은 구조



[그림 9] Kunsthaus, 완벽하게 재현할 수 있으나 Peter Cook / Colin 곡선 프레임의 가공 및 표피 Fournier(Graz, 2003) 재료의 가공에 어려움이 있

다. Peter Cook의 Kunsthaus(그림 9) 등이 대표적 사례로 이중곡면 형상의 외피를 보여주고 있다.

### 4.3 Folding

folding은 평평한 2차원적 면을 3차원적인 것으로 변화시키는 작업으로 단순히 형태를 만드는 것뿐만 아니라 기하학적 구조를 만드는 기술이기도 하다. 즉 평면적인 재료를 접으면 그 재료는 구조적으로 힘을 얻게 된다. 하지만 folding 과정은 단지 구조적 구축술에 그치지 않고 디지털 건축의 특징이라고 할 수 있는 연속된 표피를 통해 공간의 연속성과 다기능성을 제공한다. 접힌 것이 다시 펼쳐지는 과정을 통해 입체적인 folding 구조가 만들어지듯이 folding 구조를 실제적으로 구축하기 위해서는 평면적인 형판의 조합으로 다시 분해할 필요가 있는데, 이런 과정에 디지털 매체가 동원되어 3차원 대상을 2차원적으로 분석하게 된다. 'Rhinoceros', 'SolidWorks', 'LITIO'와 같은 모델링 프로그램이 자유형태적 표피구조를 효과적으로 하나씩 분리된 평판 부재로 분해하는 기능을 가지고 있는 대표적인 프로그램이다. 이런 프로그램들은 부재의 두께까지 고려하여 결합방법까지 제안할 수 있다.

folding 구축 시스템은 표피적, 공간적, 구조적 관점에서 분석될 수 있다.<sup>23)</sup> 표피적 관점에서 볼 때 folding은 sectioning과 달리 이음매 방식의 개발이 매우 중요하다. sectioning이 재료가 절단되더라도 물성 자체의 근원적인 변화가 없으므로 재료의 물성에 다소 무관하게 접근하는 방식이라면, folding 방식은 새로운 시각적, 공간적, 구축적 특징에 영향을 미치

23) Lisa Iwamoto, 전게서, p. 65.





[그림 10] Herzog & de Meuron, Walker Art Center Expansion (Minneapolis, 2005)



[그림 11] FOA, Yokohama Port Terminal (Yokohama, 2002)

테일은 매우 선구자적 역할을 하고 있다.

folding은 입체 형태를 구축하는 가장 효과적이고 정연한 방법의 하나로 많은 재료를 사용하지 않고 양감을 확보할 수 있는 공간적 구조이다. folding의 결과적 형태가 근원적으로 공간을 내포하는 입체적 형태이며, 동시에 구조적으로 장 스패의 기능을 수행하기에 유리하기 때문이다. (사진 11 참조)



[그림 12] Andrew Kudless, C\_Wall (2006)



[그림 13] Chris Bosse / PTW Architects, Watercube (peijing, 2008)

므로 재료의 물성에 더 의존하게 된다. 따라서 파손 없이 유연하게 구부러질 수 있는 금속박판, 후판 종이, 직물 등이 주로 사용되고, 레이저 절단기, 워터젯(water-jet), 플라즈마(plasma) 절단기 등을 사용하는 것이 재료의 물성을 유지하면서 다양한 방법으로 이음매를 만들 수 있어 유리하다.

‘Walker Art Center Expansion’(그림 10)의 경우 마치 구겨진 듯한 재료의 표현을 위해 사용된 folding기법은 주로 패턴화된 장식적 목적으로 사용되고 있지만, 매끄럽게 처리된 이음매 디

‘C\_Wall’(그림 12)의 경우 판상 재료를 접어 구조구축적인 블록(또는 셀) 형태로 만든 후 집합시킨 설치작품으로서, 레이저 커터기를 이용하여 종이를 가공한 후 쌓을 수 있는 형태로 접는 과정(folding)을 거쳐 보로노이 다이어그램(Voronoi diagram) 형태의 다공성 구조로 집합되었다. 파티클 시뮬레이션과 점(Point)에 기초한 데이터에 보로노이 알고리즘을 적용하여 진행되었는데, 점은 세포 형태의 볼륨으로 전환된 후 평면으로 펼쳐지고 다시 레이저로 절단된 후 다시 재조립되는 과정으로 완성되었다. 결과적으로 이 작품은 모두 다른 형태의 셀 블록이 하나의 구조물로 통합됨으로써 다양하고 복잡한 구성을 보여주고 있

으나 단일 매스로서의 치밀한 조직력을 표출하고 있다. 유사한 구축성을 보여주는 작품으로 Chris Bosse/PTW Architects의 Watercube<sup>24)</sup> (그림 13)가 있다.

#### 4.4 Contouring

대부분의 건축재료는 판상구조를 하고 있는데, 두꺼운 판상 재료를 가공하여 입체적인 부조로 만드는 작업이 contouring이다.<sup>25)</sup> 이 작업은 전통적인 수작업의 조각과정을 디지털 프로세스를 통해 재현하는 것이라 할 수 있는데, CNC 라우터와 밀링머신 등을 이용하여 디지털 모델로부터 얻어진 데이터에 따라 재료를 조각하게 된다. 특히 CNC 밀링머신은 컴퓨터 모델로부터 유연하게 실제적 구축을 할 수 있는 유용한 기계이다.

contouring은 근원적으로 재료와 시간이 많이 요구되는 특성이 있고, 전통적인 조각과정에서와 같이 원래의 형태에서 제거해나가는 제작과정이므로 재료 소비적이며, 최종 결과물은 많은 노력과 노동의 결과이므로 원래 재료가 가지고 있는 가치를 극대화시킨다. 디지털 프로세스를 이용한 contouring의 경우 유동적이고 유기적인 NURBS 형태나 패턴이 주로 나타난다. 그 배경에는 수작업으로 제작하기에 너무 많은 시간과 노력이 요구되는 작업도 디지털 프로세스를 이용하면 매우 경제적으로 수행될 수 있기 때문에 디자이너는 극단적 형태를 구축해보려는 경향을 보이기 때문이다. tessellating이나 sectioning 작업을 통한 외면적 형태가 다소 암시적이거나 대체적 성격을 띠고 있다면 contouring은 가장 직접적이고 정교한 형태를 만드는 작업이다. 하지만 건물 표피 전체를 디지털로 조각하는 것과 같이 대규모로 적용하기에는 아직 경제성이 적어 다른 디지털 구축방법에 비해 부분적이거나 소규모로 시도되고 있다. 특히 contouring 방법은 과정의 특성상 깎여 버려지는 재료가 발생하므로 필연적으로 재료가 낭비되는 문제가 발생한다. 따라서 디자이너들은 주형을 이용하여 contouring 효과를 경제적으로 극대화시키는 방법으

24) 이 작품은 외견상 Voronoi diagram과 유사하지만 정확하게는 웨이어 펠란 구조(Weaire-Phelan structure)에 근거한다. 웨이어 펠란 구조는 1993년 영국의 물리학자 웨이어(Denis Weaire)와 펠란(Robert Phelan)이 비누거품으로부터 착안하여 발견한 것으로, 어떤 공간을 최소한의 표면적으로 덮을 수 있는 셀(cells) 구조를 웨이어-펠란 구조(Weaire-Phelan structure)라 한다. 각각의 셀은 개념적으로 판상 재료가 folding되어 형성된 것이다.

25) 이 정의는 이와모토의 주장에 따른 것이며, 다른 연구에서는 ‘등고선에 따라 윤곽을 뜬다’라는 의미에서 앞에서 정리한 ‘sectioning’의 단면 늑재구조를 지칭하기도 한다(손창현, 2005).

로 forming 기법을 도입하기도 한다. 즉 디지털 프로세스를 이용해서 비교적 큰 규모의 설치작품이나 실내디자인을 위해 forming 기법을 사용하려는 경우



[그림 14] CNC 밀링머신을 이용한 contouring 작업



[그림 15] Greg Lynn, PGLife Showroom (Stockholm, 2000)

자동차 모델링을 위한 프로토타입(prototyper), 재료들을 블록으로 절단하기 위한 CNC 재단 로봇, 부드러운 곡면을 위한 CNC 라우터 및 밀링 기술이 모두 동원되었다. 단일 재료로 만들어졌지만 재료의 물성보다는 디지털 프로세스를 통해 만들어진 역동적이고 감각적인 시각적 효과가 주된 평가 대상이다.

#### 4.5 Forming

forming은 소수의 형틀을 이용하여 다수의 특정 디자인 부품 또는 자재를 만들어내는 대량생산 방식으로 경제성이 가장 큰 장점이다. 프리캐스트 콘크리트 패널, 주문생산형 테라조, 장식 몰딩 등 건축현장에서 아날로그 방식의 생산제품이 이미 많이 사용되고 있지만 다른 디자인 분야에 비해 상대적으로 크기가 크고 소량생산적인 특징이 있다. 특히 자유형태적인 부재를 생산하는 것은 기술적 한계와 더불어 경제성을 확보하지 못해 극히 제한적으로 도입되었다. 하지만 최근 디지털 프로세스를 통한 정교한 형틀의 제작이 용이해지고 경제성 또한 확보됨에 따라 다양하게 forming 기법이 활용되고 있다.

근본적으로 형틀을 이용한 생산방식이 동일한 제품의 대량생산을 지향하지만 디지털 프로세스의 도입으로 이런 개념에 변화가 이루어지고 있는데, 디지털 프로세스를 통해 비표준화된 형틀을 매우 경제적으로 제작할 수 있게 되었기 때문이다. 디지털 거푸집의 경우 일반적인 건축부재의 성형범위를 넘어서

선형작업으로 정교한 형틀을 제작해야하는데, 이 경우 CNC 밀링머신이나 라우터를 사용하여 contouring 과정이 실행되기도 한다. (그림 14) 이런 과정을 원활하게 수행하기 위해서는 일반적으로 많이 쓰이는 3축형 밀링머신으로는 불가능하고 5축형 밀링머신이 주로 사용되는데, 이런 5축형 기계는 자동차디자인 과정에서 프로토타입을 제작하는데 사용되기도 한다.

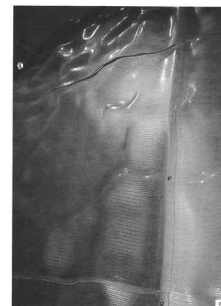
CNC 프로세스에 몰두하는 것으로 알려진 린(Greg Lynn)의 PGLife 쇼룸(그림 15) 내부의 모든 디스플레이 요소는



[그림 16] F. Gehry, Zollhof Towers (Düsseldorf, 2000)



[그림 17] F. Gehry, DG Bank (Berlin, 2000)



[그림 18] Greg Lynn, Uniserve Co. Headquarter (Los Angeles, 2002)

는 복잡한 형상 제작에 주로 적용되는데 개별적 거푸집 제작비용과 함께 특정 온도 및 압력 조건에서 성형할 수 있는 제작여건이 필요한 경우도 있다.

게리(F. Gehry)는 디지털을 이용한 거푸집공법을 건축적 스케일로 처음 시도한 건축가 중의 하나로, 최초의 디지털 거푸집을 사용한 건물로 알려진 'Zollhof Towers'(그림 16)의 경우 디지털 라우터기를 이용하여 355개의 콘크리트용 스티로폼 거푸집을 제작하여 사용함으로써 외피의 파동치는 형태를 완성하였다. 또한 자유형태의 모노코크 구조인 'DG Bank'(그림 17)의 대회의실을 시공하기 위해서는 CNC 장비로 성형된 스티로폼 거푸집을 이용하여 다시 주철 거푸집을 제작하고, 이 거푸집을 이용하여 4mm 두께의 스테인레스강판을 고온고압으로 압축성형하여 복잡한 곡률의 곡면 패널을 제작 시공하였다.

린(Lynn)의 'Uniserve Co. Headquarter'(그림 18)의 회의실 및 주방은 합판 늑재 위에 액상화된 형태의 플라스틱으로 덮여있는데, 이 표피는 컴퓨터의 파티클 애니메이션 (particle animation) 기법을 사용하여 제작되었다. 복합적인 파동 형태는 고밀도 우레탄폼을 사용하여 3축형 CNC 밀링기계로 제작되었고, 이 형틀에 1/4인치 재생 플라스틱판을 고온과 진공성형기법을 이용하여 제작되었다.

#### 4.6 소결

위에서 분석한 디지털 프로세스에 의한 자유형태적 구조의 구축 유형 및 특성을 종합정리하면 [표 3]과 같다.

[표 3] 디지털 프로세스에 의한 건축 유형 및 특성

건축 유형	특성
sectioning	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 자유형태공간을 연속된 단면으로 해석함으로써 다른 유형에 비해 건축구조적 형태 부각</li> <li>- 구조용 부재와 표피용 부재로 구성되는 경우가 많음</li> <li>- 단면 늑재 구조, 수평적 적층 구조, 와플그리드 구조 등으로 세분됨</li> </ul>
tessellating	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 디지털개념으로서의 mesh 형태 및 구조</li> <li>- 표피 부재로서의 비중이 큼</li> <li>- 일반적으로 삼각형과 사각형으로 이루어진 polygon mesh 구조가 주로 사용됨</li> <li>- 디지털 설계기법 중에서 NURBS와 mesh 방식과 직접적으로 관계됨</li> </ul>
folding	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 형태와 구조가 결합된 개념</li> <li>- 연속된 표피를 통해 공간의 연속성 제공</li> <li>- 재료의 물성에 크게 의존</li> <li>- 적은 재료로 양감을 확보할 수 있는 공간적 구조</li> <li>- 구조적으로 장 스패의 기능 수행이 가능</li> </ul>
contouring	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 후판 판상 재료를 입체화한 구조</li> <li>- 주로 재료소비적 과정을 거치므로 경제성 취약</li> <li>- tessellating이나 sectioning에 비해 직접적인 형태 구축</li> <li>- forming 기법을 이용해 유사한 효과를 경제적으로 극대화</li> </ul>
forming	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 모노코크 구조적 특징</li> <li>- 형틀을 사용하여 특정 자재를 경제적으로 생산</li> <li>- 전통적인 대량생산적 의미보다 비정형적 형태의 경제적 제작 가능성</li> <li>- 형태의 표현적 특성 부각</li> </ul>

## 5. 결론

디지털 프로세스의 도입은 디자이너의 창조력을 극대화시켰고 더 나아가 건축의 생산성을 향상시켰다. 이전의 아날로그적 접근으로는 실현이 불가능했다고 할 수 있는 자유형태의 설계는 물론 시공, 구조 등의 해석이 가능해졌고, 결과적으로 디지털 프로세스를 이용한 자유형태적 공간계획은 실험적 성격을 벗어나 점차 실제적 모습으로 나타나고 있다. 즉 공간디자이너의 조형적 의지가 건축적 제약에 의해 약화되는 것을 극복하는 계기를 디지털 프로세스가 제공하고 있는 것이다. 그런 관점에서 디지털 프로세스를 통한 자유형태적 구조의 건축적 유형의 특징에 관해 분석한 결과는 다음과 같다.

첫째, 자유형태 구조의 건축적 어려움은 기본적으로 현장 작업보다는 디지털 사전제작을 통해 현장작업을 최소화하는 방식을 통해 완성도를 높일 수 있다. 사전 제작 작업은 디지털로 제어되는 CNC 밀링 머신을 이용하여 부재를 직접 가공하거나, 거푸집을 제작한 후 부재를 가공하는 2차적인 방법이 활용된

다. 둘째, 자유형태의 구축 방식은 크게 외피와 구조 부재로 구분되어 생산된 후 현장에서 조립되는 방식과 외피와 구조부재의 구분이 없이 하나로 통합된 모노코크 방식으로 대별된다. 셋째, 재료를 고려한 디지털 기술적 관점에서 Lisa Iwamoto가 정리한 5가지 자유형태적 구축 유형의 특성을 분석한 결과, 사전제작된 부재의 현장 결합 공정이 크게 요구되는 sectioning, tessellating, folding 그룹과 결합 공정이 최소화된 contouring, forming 그룹으로 대별된다. 유형 중에서 sectioning과 folding이 가장 구조적 해석과 기능이 크게 나타나고, contouring과 forming은 표현적 특성이 더욱 부각되는 것으로 나타났다. 각각의 구축 유형은 단일로 적용되기도 하지만 복합적으로 적용됨으로써 자유형태 구축의 완성도가 높아진다.

디지털 프로세스를 통한 자유형태의 구축능력은 기술적 우월성과 창의성이 결합되어 나타나므로 건축 프로그램과 실제적 적용기술의 개발은 지속적 과제이다. 따라서 본 연구가 자유형태의 건축적 유형의 기본적 특성 분석에 그쳤으므로 향후 각 유형에 대한 심층적 연구가 요구된다.

## 참고문헌

- Greg Lynn, Animate form, Princeton Architectural Press, New York, 1999
- Greg Lynn, Form, Rizzoli, New York, 2008
- Lisa Iwamoto, Digital Fabrications, Princeton Architectural Press, New York, 2009
- Peter Szalapaj, Contemporary Architecture and the Digital Design Process, Architectural Press, Oxford, 2005.
- Philip Jodidio, Architecture Now 4, Taschen, Cologne, 2006
- 강훈, 디지털·디자인·건축, 비온후, 2005
- 강훈, 디지털 디자인 프로세스로 본 다이어그램에 관한 연구, 한국실내디자인학회논문집 15권 3호, 2006. 6
- 김동준, 정재욱, 프랭크 게리와 피터 아이젠만의 건축 디자인 프로세스에서 디지털 미디어의 적용방법과 특성에 관한 비교 연구, 대한건축학회논문집 계획계 20권 11호, 2004. 11
- 김동준, 정재욱, 디지털 건축에서 유기적 형태의 구축특성에 관한 연구, 대한건축학회논문집 계획계, 23권 12호, 2007. 12
- 김선영, 현대공간의 비물질화 경향과 초표피 건축에 관한 연구, 한국실내디자인학회논문집 34호,

2002. 10

- 김성아. 디지털 건축: 실제와 가상이 만나는 접변, 대한건축학회지 vol 49, no.11, 2004. 11
- 김성아, 서기영, 최 윤, '프로세스 가능성'으로 정의된 디지털 건축의 구현 및 활용방법에 관한 기초적 연구, 대한건축학회논문집 계획계 19권 12호, 2003. 12
- 김철규, 천동훈, 현대건축 공간구성의 비정형적 형태에 관한 연구, 한국실내디자인학회논문집 41호, 한국실내디자인학회, 2003.12
- 류창수, 곡면형상과 Glass Skin 구축에 관한 연구, 대한건축학회논문집 계획계 23권 제 1호, 2007. 1
- 박정대, 구축과 관련된 디지털 기법의 특성에 관한 연구, 대한건축학회논문집 계획계 21권 12호, 2005. 12
- 손창현, 디지털 건축에서 표명의 유연성과 구축성에 관한 연구, 서울시립대 석론, 2005
- 안윤, 류호창, 공간 모델링에 있어서 디지털 디자인 프로세스의 최적화 방안에 관한 연구, 한국실내디자인학회 학술발표대회논문집, 제8권 2호(통권 11호), 2006. 11, p. 56
- 이명식, '디지털 건축에 있어서 비표준화', 대한건축학회지, vol 49(no. 11), 2004. 11
- 이상필, 전영훈, 최윤경, 디지털 기술의 구축성에 관한 연구, 대한건축학회논문집 계획계 23권 8호, 2007. 8
- 이철재, 아방가르드와 디지털리즘, 대한건축학회지 vol 49, no.11, 2004. 11
- 이한나, 박현욱, 이종숙, 그레그 린의 자연기반 디지털 공간디자인 매트릭스 분석, 한국실내디자인학회논문집 14권 1호, 2005. 2
- 이효진, 디지털 기술 도입에 따른 건축표피의 구축적 의미에 대한 연구, 세종대 석론, 2008
- 장영희, 디지털건축과 시대이야기, 건축(대한건축학회지) vol 49, no.11, 2004년 11월, 대한건축학회
- 장훈익, 현대 주거건축에서 나타나는 탈정형적 공간구성과 다의적 표현 특성에 관한 연구, 한국실내디자인학회논문집 제 16권 2호(통권61호), 2007. 4