

# 디지털 공간에서의 보로노이 다이어그램 적용에 관한 연구

A Study on the Application of the Voronoi Diagram on Digital Space

강가애\* / Kang, Ka-Ae

윤재은\*\* / Yoon, Jae-Eun

## Abstract

Through staggering advancements of technology and network as we know them as digital revolution, we have established a foundation of space in which we can express reality by eliminating the boundaries between expression, space, and movement. There are many ongoing approaches that aim to overcome the physically-fixed property of space where the mathematical-geometric notion of Voronoi Diagram is one of them. Although the repetitive increment based on self-organization during the process in which space is generated by the Voronoi Diagram forms a pattern and focuses on the formation, its pattern is not restricted to a single method of expression but evolves over self-control.

The result of having analyzed spaces generated by the Voronoi Diagram in this study can be summarized as follows. First, the Voronoi computation method with self-organization property creates multiple levels, increments, and evolves through feedbacks among changes with the slightest order and in the absence of control. Secondly, after forming a pattern through such feedbacks comes the differentiation phase due to the presence of different properties. Thirdly, a space that has gone through the generation process retransforms through active interaction between changes and it obtains ambiguous boundaries and a repetitive pattern. This leads to an evolution of space through repetitive increments based on self-organization.

Such flexible space creation is supported by various digital technologies where we believe a converging application of these studies, sciences, engineering concepts, and space design is an effective and new method in terms of space creation.

키워드 : 보로노이 다이어그램, 발생, 자기조직화, 진화 공간

Keywords : Voronoi diagram, Development, Self-organization, Evolutionary space

## 1. 서론

### 1.1. 연구 배경 및 목적

디지털 혁명이라 불리는 컴퓨터·네트워크 기술의 발전을 통해서 정보사회는 기존의 아날로그적 단계를 뛰어넘어, 비약적인 발전을 이룩하였다. 이는 표현, 영역, 활동의 경계를 허물며 가상공간을 통해 현실공간으로 표현이 가능한 기반을 마련하였다.

과학이나 공학적 개념들은 컴퓨터 프로그래밍을 통해 이론의 개념적 차원에서 그치는 것이 아닌 응용 가능한 형태로 현

실화되고 실용화되는 경우가 많다. 이것은 비단 과학이나 공학에서 뿐만 아니라 추상적 개념을 가시화하고 현실화하는 다양한 작업에서 적극적으로 나타나고 있는데, 공간디자인은 그 한 예가 될 수 있다. 컴퓨터를 활용한 새로운 시스템의 이용은 공간의 구성 및 형태생성 뿐 아니라 이미지를 만들어내는 새로운 방식을 제공하고 있다.

공간이 가지는 물리적 고정성의 한계를 극복하고 건축 환경이 가지는 수많은 정보와 요구의 수용을 위해서 디지털 공간 디자인에서는 다양한 시도들이 이루어지고 있는데, 수학적·기하학적 개념의 보로노이 다이어그램(Voronoi Diagram)의 이용이 바로 그 중의 하나이다. 보로노이 이론은 컴퓨터 프로그래밍과 결합하여 만들어내는 발생적이고 진화적인 공간과 형태를 구현하는 과정중심의 디자인 방법론이다. 본 논문에서는 보로

\* 정회원, 국민대학교 테크노디자인대학원 실내디자인전공 석사과정

\*\* 정회원, 국민대학교 실내디자인학과 부교수

(교신저자, dreamask@kookmin.ac.kr)

노이 다이어그램을 공간화 할 때 디지털 공간에서 어떻게 적용하는지 연구해보고자 한다. 보로노이 다이어그램의 이론적 배경과 규칙 및 적용 사례분석 등을 통해서 보로노이 다이어그램이 가지는 포괄적 원리 및 응용 방법을 통해 보로노이 다이어그램의 활용 가능성을 파악하는 것이 본 논문의 주목적이다.

## 1.2. 연구 범위 및 방법

본 논문의 범위는 주로 2000년 이후의 디지털 공간에서 보로노이 다이어그램을 디자인 도구로 활용한 프로젝트를 중심으로 문헌 고찰과 인터넷 검색을 토대로 연구하였다. 실제 건축되지 않은 계획안인 프로젝트도 다양한 사례 분석을 위해 연구의 범위에 포함하였다.

먼저 이론이 실행되는 장인 디지털 공간과 보로노이 다이어그램이라는 개념에 대한 이론적 고찰과 특성을 살펴보고, 형태의 발생과 연관된 패턴형성의 과정과 특성에 대해 분석을 하고자 한다. 또한 보로노이 이론이 내포한 은유적 해석에 의한 상징성을 통해 진행 과정의 특성을 도출한다. 이에 따라 도출된 거시적 특성인 자기조직화에 따른 공간화 생성의 과정을 살펴보고자 한다. 3장에서는 생성 과정의 실현을 위한 건축 환경이 가진 정보의 적용 방법에 관해 분석 후 각 사례를 살펴보도록 한다. 끝으로 2장의 보로노이 이론의 고찰을 통해 도출한 특성과 3장의 정보 분석을 통해 발견된 특성과 그 활용 가능성에 대한 정리로 마무리 한다.

## 2. 디지털 공간과 보로노이 다이어그램의 이론적 고찰

### 2.1. 디지털 공간의 개념

#### (1) 디지털 세계관의 형성

오늘날 디지털 시대는 비물질적 정보를 유연하게 다룰 수 있게 한 기술적인 기반인 컴퓨터 프로그래밍을 통해 자유로운 논리 구사의 장이 되었다. 이 변화의 핵심인 정보는 비물질적인 것에서 기술과 사고를 기반으로 한층 더 강화 되어 물질적 변화로 나타난다. 따라서 디지털 공간은 정보의 혼합과 네트워크의 결합이 만들어 내는 실제의 공간과 매개적 역할로 이해된다. 디지털 공간에서 활동하고 체험되는 내용은 인간이 겪는 실제 현실이기에 가상의 디지털 공간은 실현된 것과 함께 공존한다고 볼 수 있다.

#### (2) 디지털 공간에서의 객체화 된 정보의 활용

디지털 공간의 구현에 있어 정보를 핵심 성분으로 활용하는 도구적 매체의 예로 매개변수에 의한 공간 생성 과정을 들 수 있는데, 공간의 형태를 발전·변형·수정하기 위해 공간에 영향을 주는 내·외적인 정보를 계산식에 의해 매개변수화 하여

정보의 양과 시간의 흐름이 규칙에 따라 시뮬레이션 되면서 형태가 잡혀져 나가는 방법이다. 매개변수에 의한 디자인에서는 초기의 변수를 정의하는 것이 필요한데, 서로간의 연산적인 혹은 수학적인 관계성을 밝히는 변수와 외부의 영향력을 부여하여 연산원리에 의해 상호반응하게 된다.

### 2.2. 보로노이 다이어그램의 이론적 배경과 특성

보로노이 다이어그램<sup>1)</sup>은 1850년에 디리클레(Peter Gustav Lejeune Dirichlet)에 의해 처음으로 제안되고 우크라이나의 수학자 보로노이(Georgy Voronoy)<sup>2)</sup>에 의해 정의되어 지리·의학·로봇 경로 계획·이미지 처리 등의 여러 분야에서 사용되고 있는 기술이다. 자연계의 현상과 공간의 구조를 설명해줄 수 있는 매우 유용한 다이어그램으로 프랙탈 이론, 카오스 이론 보다 훨씬 먼저 나왔으나 각광을 받기 시작한 것은 이들보다 훨씬 늦은 최근 몇 년 전 부터이다. 보로노이 다이어그램은 CAD, CAM 등의 파일 압축 혹은 마이크로 테크놀로지에 있어 분자구조의 수학적 연산 등에 응용될 뿐 아니라 이를 확장하면 프랙탈 이론처럼 가시적인 자연현상 및 비가시적인 사회현상을 설명해주는 도구로 진화할 수 있는 가능성을 충분히 가지고 있다. 또한 보로노이 다이어그램은 기하학적 구조에서 출발하였기 때문에 공간 생성과도 상당한 연관성을 가지고 있다. 공간을 효율적으로 분할하는 수학적 방법, 공간 내 입자들 간의 영역을 분할하는 방법을 연구함으로써 공간에 대한 다양한 추론을 가능케 하는 수리 및 계산 도구로 알려져 있다. 또한 이는 연산 기하학(computational geometry)에서 기본적인 문제이며, 전형적으로 구성된 것들을 살펴보면 물체에 대해 다각형, 곡선 등과 같은 모델로의 가정에 기초한 연속적인 것인데, 공간에 대한 고려가 필요한 곳에서 모두 쓰인다.<sup>3)</sup>

보로노이 다이어그램은 공간 스스로 그것이 속한 환경의 변화에 요구되는 것과 반응 속성을 활발히 소통하는 시스템을 지향한다. 건축은 사회 및 환경의 복잡성을 지닌 공간을 창조하고 이에 있어 정보의 수집과 추이는 공간을 형성하며 건축적 해결 사항을 뒷받침하기 위해 연산 가능한 공간에서 중요한 부분이 되었다. 따라서 정보는 공간을 변화·적용·조정하기 위한 뒷받침이 되어 컴퓨터 테크놀로지와 함께 건축에서의 보로노이 이론은 적용성 및 지원성이 높아졌다.

#### (1) 형태의 발생 이론과 알고리즘

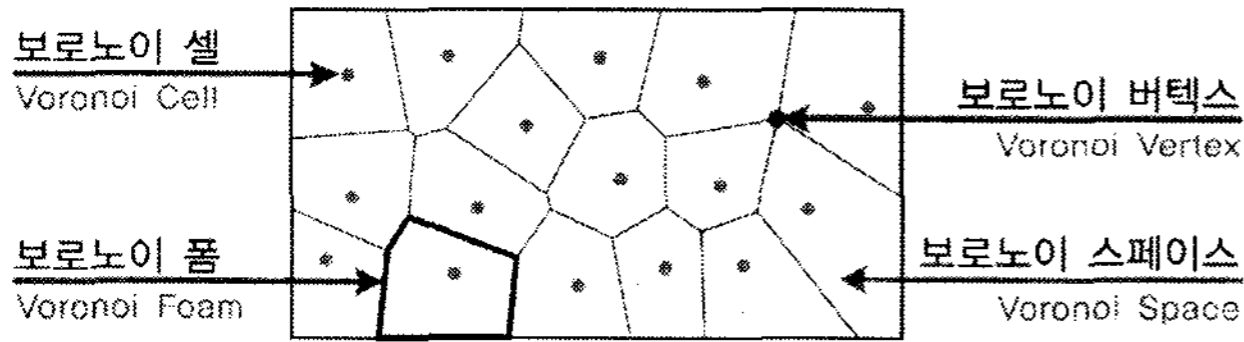
공간 채움(space-filling)의 점집합론적 위상기하학 구조인 보로노이 다이어그램의 완성은 건축적 환경에서 정보의 교환을 시뮬레이션 하는데 있으며, 객체의 분할에 따라 하위 공간의 집합인 전체 공간을 해체한다. 보로노이 다이어그램은 보로노

1)Voronoi Tessellation, Voronoi Decomposition으로 불리기도 한다.

2)Georgy Feodosevich Voronoy. 러시아 출생의 우크라이나 수학자

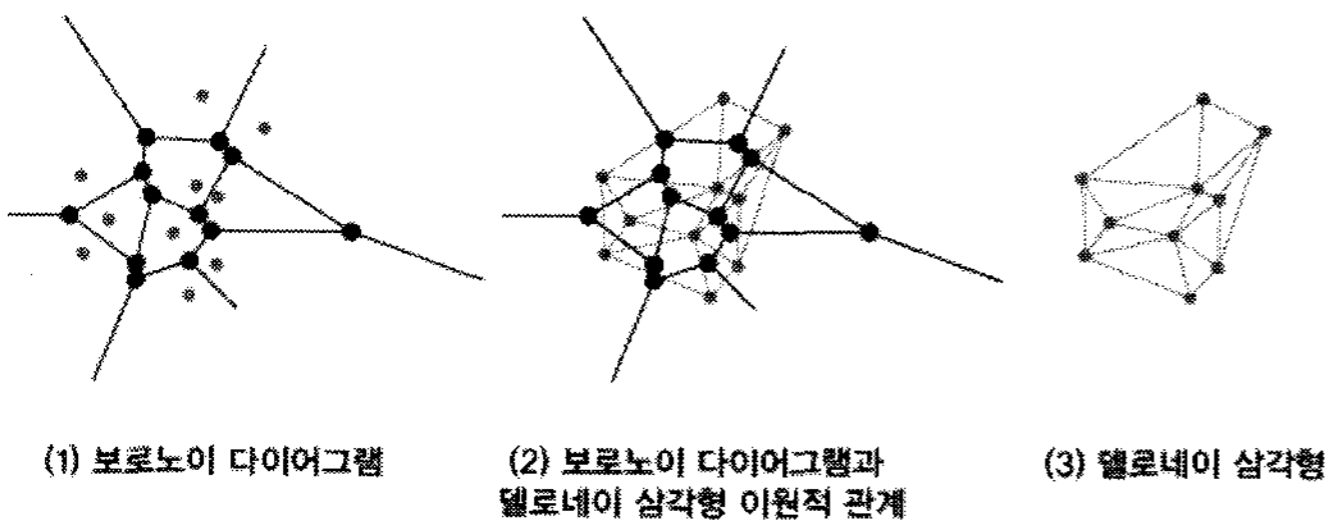
3)"Voronoi Diagram" Wikipedia Online

이 셀(소자), 보로노이 버텍스(정점), 보로노이 스페이스(공간), 보로노이 폼(발포체)으로 구성되어 있다.



<그림 1> 보로노이 다이어그램의 구성

보로노이 다이어그램은 점 데이터들이 주어지고, 각각의 기준점이 하나만 포함되도록 영역을 근접하게 분할하고자 할 때, 분할된 영역의 임의의 점이 다른 영역의 기준점에서의 거리보다 자신이 속한 영역의 기준점까지의 거리가 제일 가깝도록, 최단 영역을 찾아내는 알고리즘(algorithm)을 다이어그램으로 표현한 것이다. 이러한 보로노이 다이어그램의 특징은 임의의 시작점을 중심으로 각 정점이 다른 정점에 영향을 주지 않고 최대 가질 수 있는 범위를 표현하기에 적합하다. 보로노이 셀은 입력 초기 값으로서 분할된 모든 영역(보로노이 스페이스)들은 단 하나의 셀을 가져야 한다. 발포체는 스페이스에 의해 만들어진 영역이 가지는 다각형 모양이다. 이것은 공간적 정보를 수집하여, 근접한 패턴으로 분류·조직 할 수 있는 공간적 성격을 발견하는 것이 가능하며, 공간 스스로의 정보 조작의 결과이다. 그리고 보로노이 버텍스는 임의의 정점을 포함한 영역에서 다른 두 개 이상의 정점이 가지는 영역들과 만나는 점으로써 각 다각형의 정점을 나타낸다.<sup>4)</sup>



<그림 2> 보로노이 다이어그램과 델로네이 삼각형<sup>5)</sup>

보로노이 다이어그램에서 한 변을 공유하는 영역의 정점끼리 선을 이으면 델로네이 삼각망(Delaunay Triangulation)이 된다. 델로네이 삼각망을 먼저 구하면, 각각의 삼각망의 변을 따라가면서 그 삼각망의 외접원의 중심과 변을 공유하는 삼각망의 외접원의 중심을 이으면 보로노이 다이어그램을 얻을 수 있다. 보로노이 다이어그램의 각 셀에서 인접한 셀끼리 선을

연결하면 델로네이 삼각망이 된다. 즉 <그림 2> 와 같이 들 중 어느 하나만을 찾아낸다면 다른 하나도 찾아낼 수가 있는 것이다. 공간의 삼각형 분할은 가장 가까이에 있는 정점의 인접 객체를 정의하고, 두 이론의 결합은 접속성, 최소한도의 근접과 최대의 근접을 위상적 관계의 네트워크를 만든다. 한층 나아가서 균등하거나 서로 관련된 본질들의 경계설정과 배치는 보로노이 다이어그램으로부터 시작될 수 있다. 보로노이 발포체는 분류·조직된 통일성 있는 패턴으로 공간 정보의 집중과 공간 지표의 위치추적을 용이케 하는 동시에 정보의 조작을 가능케 한다.

전체 공간을 객체의 분포구역에 따라 하부 공간 집합으로 해체하고, 각 정점은 보로노이 셀의 중심을 나타내는데, 객체와 붙어있는 공간적 인접지인 작용 공간(influence space)이 포함되어 정의된 독자적 보로노이 공간을 가진다. 보로노이 셀의 내부는 다른 객체와 공간적 관계를 야기하는 위치선정을 위한 접합 객체를 담고 있다.<sup>6)</sup>

컴퓨터 프로그래밍과 결합을 통해 새로운 진화적 알고리즘으로 재생된 보로노이 다이어그램은 진화적이며 자기발생적 도구로 이용될 수 있다. 근본적으로는 도구로만 인식되었던 기술에 변형적·변이적 생명성을 가진 보로노이 다이어그램은 자기발생적인 수학적 이론과 디지털 공간의 매개체로 거듭날 수 있다. 또한 규칙을 가진 체계와 구성요소의 지속적인 진화와 동시에 개체간의 상호작용을 통해 통제외 부재 하에 자연발생적 패턴의 창발이 이루어진다. 보로노이 이론의 규칙은 사용지시와 같은 것으로서, 하나의 생성이 어떻게 수행되어야만 하는가를 불분명하지 않게 규정하며 유한한 질서들에 따라 서로 다른 상태들 사이에서의 비약적인 형태로 움직인다. 또한 이 이론의 보급은 새로운 생성 시스템의 지각과 적용의 출발이며, 그 자체가 자연계를 따른 환경으로써의 상호작용체이다.

(2) 은유적 해석에 의한 상징성

컴퓨터 프로그래밍에 의한 기술과 도구를 어떻게 활용할 것인지에 집중하여 과학이나 기술을 도구적 차원으로 활용하는 경우를 상기에 서술하였다. 또 다른 접근은, 보로노이 다이어그램이 각각 수학·공학·예술 분야에서 활용되고 있는 기반의 내포 개념을 포착하여 그 개념의 세분화 과정과 응용이 어떻게 새로운 패러다임으로 제시될 수 있는가 하는 점이다.

공간을 진화 시키는 이러한 자기발생적 도구에 내재된 기하학적 구조의 원리에 초점을 맞추는 동시에 공간생성에 있어 의미론적 진화가 가능하다. 나아가 컴퓨터 프로그래밍을 통해 보로노이 다이어그램의 원리를 기초로 구현되는 공간의 진화에 발전 가능성이 잠재되어 있는 개념의 상징적 도구로써 응용될

4)Paul Coates, Christian Derix, Generating architectural spatial configurations. Two approaches using Voronoi tessellations and particle systems, 8th Generative Art Conference GA2005. 참고.

5)지용재, 색종이 모자이크 렌더링을 위한 타일 생성 및 배치에 관한 연구, 중앙대 석사논문, 2007, p.11

6)Paul Coates, Christian Derix, op. cit., p.3

수 있다. 이는 기하학적 구조의 보로노이 다이어그램을 자연계(自然界) 속에 놓고 이것이 반복적 작업능력을 지닌 컴퓨터 프로그래밍에 의해 공간에서 번식하고 증식하는 과정을 추적하여 자기조직화를 통한 공간 생성을 하는 생명체로 볼 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 보로노이 다이어그램은 아주 간단한 기하학적 인식에서부터 출발한 점에 주목한다. 그것은 고대인들이 자신과 남의 땅 영역을 가르기 위해 경계선을 긋기 위해 했던 고심(古心)과 비슷하지만 보로노이 다이어그램 속에는 경쟁적으로 금을 긋는 것이 아니고 그 속에서 양보와 조화, 그리고 균형을 찾는 방법이 있다.<sup>7)</sup> 우주만물과 만상은 유리(有理), 유기(有氣)하며 유상(有像)한 고로, 외형물체(外形物體)에는 그 형상(形象)에 상응한 기상(氣象)과 기운(氣運)이 내재(內在)해 있다고 본다.<sup>8)</sup> 다시 말해 공간은 모든 것이 혼합되어 복잡하고 변화무쌍하기 때문에 이를 연속적 인식 가능한 것으로 붙잡아 매기 위해서는 적절한 기준의 제시와 압축의 과정이 필요하다. 다이어그램의 활용은 여기서 적절한 수단이 된다. 정보의 압축과 자유롭게 수영(游泳)할 수 있는 상징적 이미지로 공간사고의 변화와 의도를 나타낼 수 있다. 관념, 기능, 미학적 기준, 사회적 문제 등 공간에 담으려는 의미를 소거하며 순수한 내부형식의 과정 그 자체를 구조적 형식의 발생적 구성요소로 인식하여 생성되는 개체들의 시스템으로 내세운다. 이는 궁극적으로 보로노이 다이어그램이 함축적이고 설명적인 형태로 공간생성의 개념적 상징성을 뛰어넘어 요소들의 비표준 확장성을 드러낸다고 볼 수 있다.

### 2.3. 보로노이 다이어그램의 자기조직적 공간화

보로노이 다이어그램은 최소의 규칙으로 구성 요소간의 상호작용이 이루어진 체계를 가지고 지속적인 진화를 하는데, 이는 자기조직화라는 특징적 과정으로 볼 수 있다. 자기조직화를 통한 패턴의 창발은 반복적 증식을 하며 공간의 진화를 수행한다. 앞서 살펴 본 보로노이 다이어그램의 특성에서 도출된 자기조직화, 반복적 증식, 진화공간을 본 장에서 각 의미를 고찰 후 이 과정들이 공간과 실재하는 정보들의 결합이 어떻게 활용이 되는지 살펴보고자 한다.

<표 1> 보로노이 다이어그램의 특성

개념	주요특성	도출된 과정
Voronoi Diagram	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 체계와 구성요소로 지속적 진화</li> <li>· 부분(개체)간의 상호작용</li> <li>· 질서 있는 패턴의 자연발생적 창발</li> <li>· 공간사고의 변화와 디자이너의 의도를 내재한 체계의 발생적 형태</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>자기조직화 self-organization</li> <li>반복적 증식 palingenesis</li> <li>진화 공간 evolutionary space</li> </ul>

7)황인, Artist Project, 예술과 과학의 만남, 2005, p.57  
8)최창조, 한국의 풍수사상, 민음사, 1984, p.39

### (1) 디지털 테크놀로지에 의한 자기조직화

자연계의 복잡한 모든 것들을 존재하게 하는 것은, 상호작용을 주고받는 많은 것들이 복잡성을 창조하며 자기조직성을 띤 개체들의 피드백 때문이라 볼 수 있다. 이는 개체와 개체간의 복합적 행동이 피드백 순환 형태로 서로의 행동을 변화시킴으로써 자기조직성을 가지고 있기 때문이다.

자기조직화의 의미는 시스템의 구조가 외부로부터의 분명한 압력·통제와 관련 없이 스스로 증가한다는 것이다. 자기조직화의 정의는 다음과 같다.<sup>9)</sup>

- ① 외부압력 없이 시스템이 조직적인 형태로 진화
- ② 시스템 자체의 컨트롤 하에서, 넓은 영역의 상태공간에서 더 작고 안정된 상태로 이동하는 것. 작은 영역의 상태공간을 끌개(attractor)라고 부름
- ③ 특정한 법칙 하에서 작동하는 독립적인 변화들을 위한 시공간에 걸친 상호관계(pattern)의 도입

<표 2> 자기조직화의 특성

일반적 특성	설명	함축된 특징
· 외부통제의 부재	자율성	통제의 부재
· 역동적 작용	시간에 따른 진화	
· 이동	난조 / 선택을 통한 탐색	피드백
· 균형의 파괴	자유도의 상실 / 이중성	
· 총체적 질서	지역적 상호관계를 통한 창발	다층의 레벨
· 단일	에너지의 산포 / 평형에서 멀어짐	
· 불안정성	자기보강의 선택들 / 비선형성	
· 복수의 평형	가능한 많은 끌개	
· 임계	경계효과 / 국면의 전환	
· 잉여	손상에 대한 둔감성	
· 자기유지	수복 / 재생의 물질대사	
· 적응	외부환경 변화를 추적	
· 복잡성	다중화 된 동시발생의 가치나 목적	
· 계층화	다층으로 짜여진 자기조직적 레벨	

상기의 자기조직화의 특성<sup>10)</sup>들을 통제의 부재, 피드백, 다층의 레벨 등 대표적 3가지 특질로 압축할 수 있는데,<sup>11)</sup> 여기서 통제의 부재란 전체와 개체간의 경쟁과 협력에서 통제 없이 형성되는 규칙을 의미한다. 이로써 내적 변화와 외부환경에 대한 항상성을 갖기 위한 피드백과 복수의 자기조직레벨을 가지게 되며, 다층의 레벨에서 창발현상이 나타난다. 즉, 자기조직화란 개체간 피드백의 과정이다.

이와 같은 자기조직화의 특질들을 전제조건으로 가지고 보로노이 다이어그램의 자기조직화를 살펴본 결과, 자기조직화는 통합을 위한 과정과 변위를 통하여 이루어질 수 있는 가능성을

9)http://www.calresco.org/sos/sosfaq.htm 자기조직화 특성은 객관적인 자료 분석을 통해 자기조직화를 연구하고 있는 복잡계 과학, 예술, 인문연구 네트워크 'Calresco'의 정의를 수용하였다.

10)http://www.calresco.org/sos/sosfaq.htm

11)유명희, 자기조직화 이론과 현대건축공간구성의 상관성 연구, 홍익대 박사논문, 2004, pp.51-52

드러내는데 그 진행과정을 <표 3>에 제시된 사례분석으로 네 단계의 미시적 과정을 찾을 수 있었다. 자연계 혹은 포함해야 할 정보를 점 데이터화 시키는 것으로 출발하여, 이 점 데이터들은 서로의 생성을 자극하며 선으로 연결되고 이 선들은 다각형의 형태로 나타나 면을 이룬다. 이 면들의 집합은 세포질을 이루는데 이 세포질은 고유의 매개변수로 인해 구성 체계를 가지게 된다. 이 구성 체계는 점 데이터의 사상화의 촉매역할을 하고 이 관계들은 어떤 적합한 형태가 나오도록 연속적 반복을 거듭한다.

<표 3> 보로노이 다이어그램의 자기조직화 과정

작품 (작가)	이미지			
Smooth 3-D (Andrew Baccon, 건축적 공간화 계획안)				
특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 오토메이션 스크립트 이용, 파라미터 곡선 생성</li> <li>· 임의의 복잡한 표면과 사선의 그리드 패턴으로부터 매개구조 산출</li> </ul>			
C.Wall (Andrew Kudless, 공간 설치물)				
특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 기하학적 · 재료적 파라미터 조절, 보로노이 기하구조로 변화의 용이</li> <li>· 점 데이터와 입자운동의 데이터 구현</li> </ul>			
Net.Lab (G-nome, 건축 공간의 계획안)				
특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 분포된 견결한 점 데이터의 비선형 조직화 시도</li> <li>· 수치에 따라 분화된 공간에서 연속적 시스템 형성</li> </ul>			
P.Wall (Andrew Kudless, 공간 설치물)				
특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 구름이미지의 점 이미지를 그레이스케일화</li> <li>· 패턴의 자기조직화에 대한 변이성 자율성 연구</li> </ul>			

P:points-점, L:line-선, PL:polygon-다각형, S:surface-면, C:celluar-세포, M:method-구성 체계, MP:mapping the points-점 데이터의 사상화, I:iteration-반복

위의 사례에서 보는 바와 같이 보로노이 다이어그램에 의한 자기조직화 과정은 분열을 하는 개체의 집단이 성장하며, 좌표 혹은 매개변수를 이용해 개체 고유의 패턴을 형성해 나간다. 패턴의 형성 후 개체 유형들은 분화를 통해 또 다른 개체집단을 생성한다.

### (2) 자기조직화에 의한 반복적 증식

물질적 생산과 전자적 재생산이 불가분의 관계로 연결되어 있고, 오늘날 디지털 테크놀로지는 개별화와 차별화, 그리고 시간의 다층화를 촉진시켜 디지털 공간의 차별적인 모습으로 나타나고 있다. 이는 형태에 대한 관심으로 이어져 공간 생성에 있어 큰 변화를 가져왔다. 분리되어 객체지향적 개체들은 컴퓨

터 프로그래밍을 통하여 다시 연결되고 확장될 수 있으며, 그리하여 실제의 물질적 영역과 전자적인 확장적 공간의 존재가 중첩되는 것이다. 이는 개체들의 자기조직화에 의한 변화로 끊임없는 피드백에 의해 개체 집단은 복제와 재생산을 통한 증식의 과정을 거친다.

<표 4> 자기조직화에 의한 반복적 증식의 공간화 과정

작품 (작가)	이미지			
Infinite Tower (Urban Future Organisation, 건축적 공간화 계획안)				
특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 각 세포가 환경에 대응, 부분적인 질서에 따라 작용하지만 총체적 형식 조합에는 따르지 않음</li> <li>· 형식, 구조, 외장의 알고리즘과 생산적인 과정을 드러냄</li> </ul>			
Watercube (SIAL, 공간 설치물)				
특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 복잡한 격자를 사용에 따른 다각형 생성</li> <li>· 세포의 불분명하고 불확실한 외관 생성과 구성 요소의 표준화</li> </ul>			
Smooth 3-D (Andrew Baccon, 건축적 공간화 계획안)				
특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 패턴을 읽고 그에 상응한 다면체 집합 생성</li> <li>· 평면요소로 구성 후 복잡한 곡면구조, 물결무늬와 구조 표현</li> </ul>			
Net.Lab (G-nome, 건축 공간의 계획안)				
특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 공간을 연속된 도형으로 읽고 벽체, 바닥, 구조의 비구분</li> <li>· 확정된 부피 안에 융합시켜 해석</li> </ul>			

<표 4>에서 보는바와 같이 구성된 개체집단 혹은 세포질은 다시 자기조직화를 통해 반복적 증식을 한다. 이 과정은 서로 다른 특징들을 가진 개체들이 발현되고 활성화 된 조건을 가진 개체들이 조합을 이룸과 동시에 분열된다. 분열된 개체는 다시 성장하여 패턴이 형성되고 이 개체들은 더 큰 형태를 갖추어 증식을 하게 되고 인접한 다른 개체에 영향을 미치며 생성된다.

### (3) 자기조직적 진화 공간

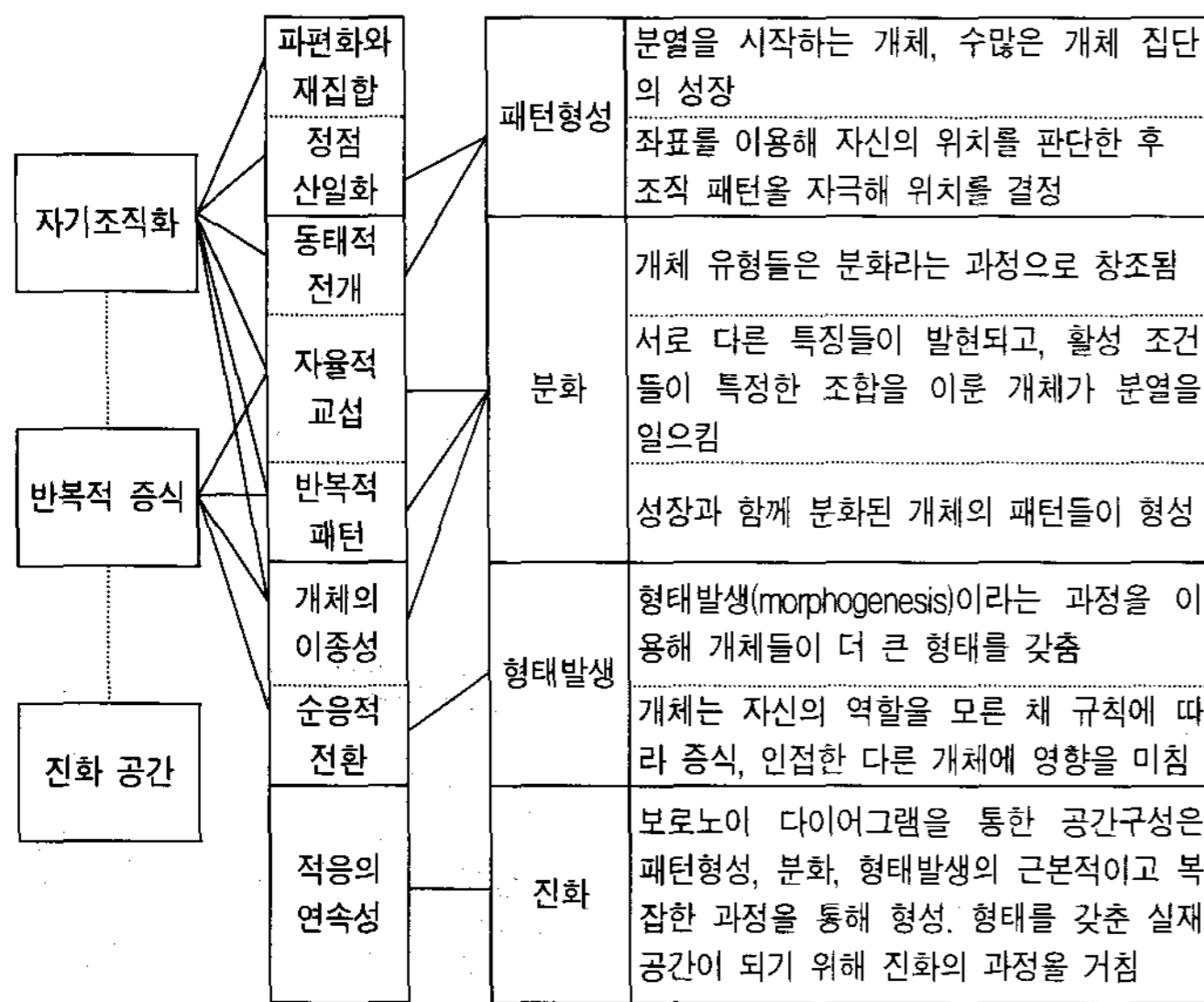
진화는 모든 컴퓨터 기술의 기초를 이루며 눈부신 발전을 거듭해왔다. 그러나 진화의 진정한 힘은 결과에 있는 것이 아니라 결과를 이뤄내는 과정에 있다. 진화는 '더 나옴'을 의미하지 않으나, 진화가 어떤 결과를 산출하는 다른 과정들보다 더 나올 수는 있다. 그러나 진화는 '개량'을 의미하지는 않는다. 진화는 방향성이 부여된 변화의 점진적 과정이다. 그러나 그러한

과정 모두를 진화라고 부를 수는 없다.<sup>12)</sup>

보로노이 다이어그램의 특성에서 도출된 발생의 과정은 자기조직화에 기초한 반복적 증식의 공간 진화이다. 보로노이 다이어그램을 이용한 공간의 생성에는 생물학적 관점의 네 가지 주요 과정이 있는데 첫 번째는 공간적 조직화, 즉 패턴 형성이 다. 두 번째는 개체 분화를 거친다. 개체는 저마다 위치가 다르기 때문에 서로 다른 특징, 역할을 갖게 된다. 세 번째는 형태 발생, 즉 형태의 변화 과정이 있다. 마지막으로 공간화가 되기 위한 진화를 하게 된다. 보로노이 다이어그램은 최소의 기본 규칙 안에서 개체들은 번식을 하는 동시에 선택적 변이를 하며 진화해 개체 공간을 만든다. 개체반응의 최종적인 결과는 공간의 진화에서 나타나며, 이는 개체반응의 총체적 과정임과 동시에 공간생성의 결과로 볼 수 있다. 자연계의 모든 발생은 안정적인 형태를 찾는데 촉진적 역할이 되기 때문에 이러한 생물학적 접근은 보다 유연한 공간 접근의 가능성을 시사한다.

이상의 논의에서 보로노이 이론의 특성인 자기조직화, 반복적 증식과, 진화 공간은 상기와 같이 정리될 수 있으며, 3가지 특성을 통해 드러난 패턴형성, 분화, 형태발생, 진화에 의한 공간화의 거시적 과정으로 볼 수 있다.

<표 5> 보로노이 다이어그램의 특성에 의한 공간 발생의 과정



### 3. 보로노이 다이어그램의 적용의 접근 방법

보로노이 다이어그램은 공간 채움의 점집합론적 위상기하학 구조를 산출하며 비정형 격자를 통해 설명되는 매우 근원적이며 유용하고 실용적인 복합개념이다. 응용가능성이 탁월한 이 이론은 자연의 현상 및 원리를 표현하는데, 특히 기하학적·결

합적·확률적인 특성, 컴퓨터 기반의 구성가능성과 개념 작용의 표현가능성을 내포한다. 이어서 본 장에서는 보로노이 이론이 실현이 될 장(field)과 공간이 형성 되는 주위 환경이 가진 데이터의 변환과 적용에 초점을 맞추었다. 장은 데이터 소자의 주변에서 일어나는 작용의 활동영역이며, 공간은 소자와 그들의 관계에 의해 형성된다. 고도로 발전한 분석 프로그램은 정점 주변의 영역을 산출하고, 상호작용을 위해 가까이 있는 정점들을 탐지한다. 디지털 공간 생성을 위한 다양한 형태의 영역과 복잡한 건축적 상황의 요소들이 보로노이 다이어그램과 이원적 개념인 델로네이 삼각망 이론 속에서, 연결되는 방식과 그 장에서 이루어지는 물질, 사람, 정보의 흐름을 중요 구성인자로 보고 풀어내었다.

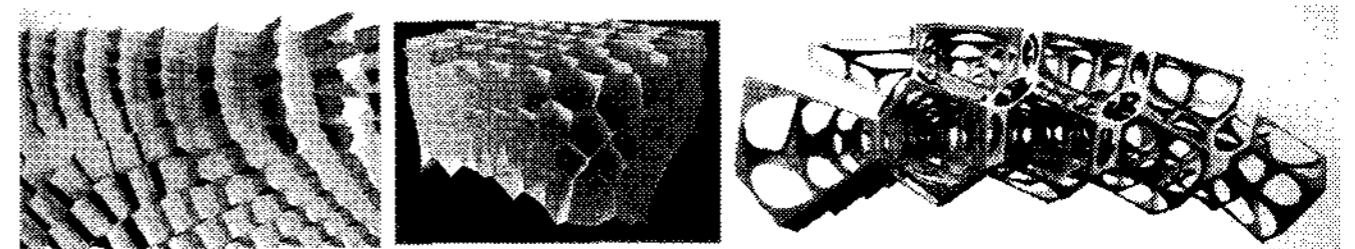
#### 3.1. 발생 방식의 적용

2장에서 보로노이 다이어그램 특성에 의한 공간 발생의 과정(패턴형성, 분화, 형태발생, 진화)을 살펴보았는데, 디지털 공간에서의 비경계성에 의한 다양한 학문의 은유적 활용을 통해 보로노이 다이어그램이라는 체계구조를 채용하여 발생학적 관점으로 공간 생성 과정을 시뮬레이션 함으로써 접근과정을 풀어내었다.

##### (1) 요소의 형상화

앞에서 서술한 발생 방식의 과정의 적용을 위해서는 구성 요소의 형상화를 위한 생물학적 접근의 관점이 필요하다. 개체간 피드백을 통해 패턴형성을 한 후 서로 다른 특징들의 발현과 분열로 분화의 과정을 거친다. 그 후 형태발생이라는 과정을 이용해 개체들은 더 큰 형태를 갖추게 된다. 이러한 보로노이 다이어그램을 통한 공간구성은 실재공간이 되기 위해 진화의 과정을 거쳐 공간으로 생성된다.

앤드류 베이컨(Andrew Baccon)은 스무스 3D(Smooth 3-D) 설계에서 자동 연산을 이용하여 매개곡선을 생성하였다. 3D 보로노이 타일링 연산은 임의의 복잡한 표면과 경사진 그리드 패턴으로부터 무늬가 풍부한 매개구조를 산출하였고, 평면요소로 구성하여 복잡한 곡면구조와 물결무늬의 구조를 피하였다. 디자인은 형태를 유도하는 매개구조로써 보로노이 다이어그램을 이용하여 공간적 진화를 시도하였다.



<그림 3> 앤드류 베이컨, 스무스 3D(건축적 공간화의 계획안), 영국, 2007

#### 3.2. 환경 분석에 의한 매개변수 추출

분석 단계에서 수많은 정보의 속성이 객체화 되어 주어진

12) Peter J. Bentley, 디지털 생물학, 김한영 역, 김영사, 2003, pp.58-59

환경 정보에 의한 맥락적 접근을 통한 공간 구성, 관계의 추상적 데이터의 객관화가 건축가의 사고로는 분석·조합·조절에 있어 객관성을 지니기 힘든데 이러한 정보를 수치화 하고 합리적 선정을 통해 유연한 공간 생성이 가능해진다. 분석 처리 과정에서 변수들을 활성화 시켜 그 사이에서 또 자기조직화 체계가 생기고 끊임없는 변화와 반응을 일으키게 된다. 이 과정은 주어진 환경의 정보와 요구 사항을 보로노이가 가진 규칙에 의해 재정의, 재위치 되어 공간의 생성에 있어 발전적인 결과물을 얻어낼 수 있다.

#### (1) 공간의 상관성 분석

자하 하디드(Jaha Hadid)의 국립 가오슝 퍼포밍 아트 센터(National Kaohsiung Performance Arts Center) 계획안은 대지 주변 및 환경 데이터의 관계를 분석하였다. 대중의 진입을 조절하기 위해 보로노이 다이어그램을 사용하여 이 지역의 귀한 나무, 역사적 건물, 대지경계 등 공간과 건축 환경의 상관성 분석을 통해 점집합의 영역을 만들어 대지의 주 보행동선과 연결되어, 이 공간은 통행을 조절하는 수단이 되었다. 건물 자체의 형태 역시 보로노이 다이어그램을 통해 도출한 시각적 데이터의 변형에 근거하여 캐노피, 파사드, 지붕 등에 반영하였다.



<그림 4> 자하 하디드, 국립 가오슝 퍼포밍 아트 센터(계획안), 대만, 2007

#### (2) 구성요소의 점유율 분석

앤드류 쿠들리스(Andrew Kudless)의 툴룸 고대 박물관(Tulum Museum)은 3차원 보로노이 골재 시스템을 건물 규모로 구체화한 프로젝트이며, 고고학의 중요한 장소인 대지 성격과 박물관 주변의 흐름, 변동의 재배치를 보로노이 이론을 바탕으로 정렬하였다. 연속된 띠들은 동선의 흐름을 수직으로 정렬, 방문자들의 움직임, 지역적 공간 분포를 분석 후 세포집합 구조체로 풀어내었다. 고밀도와 저밀도의 영역에 대한 동선은 환경 분석에 의한 보로노이의 연산에 의한 변이적 패턴으로 포장되었다.



<그림 5> 앤드류 쿠들리스, 툴룸 고대 박물관(계획안), 멕시코, 2006

### 3.3. 정보의 피드백을 통한 선택

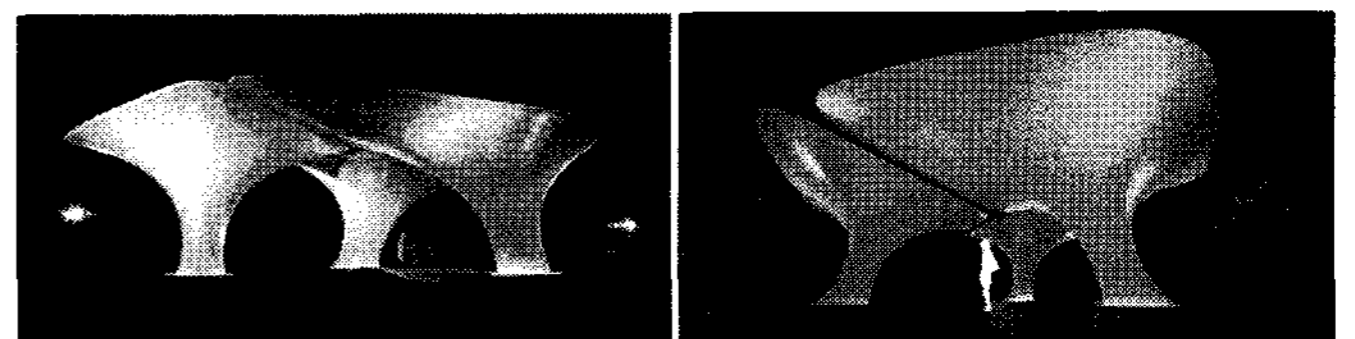
난해하고 관념적인 철학에 근거한 언어들로 개념적 서술이 주를 이루는 공간의 생성 및 형태 연구는 인식에 있어 자의적 해석으로 어려움이 있었다. 따라서 객관적 영역 정보를 밑바탕으로 구성 요소의 데이터화하고, 이러한 데이터의 점집합 영역을 만들어 적용시키며 공간 진화가 진행이 된다.

건축을 위한 공간의 컨텍스트, 행위, 지각, 감성 등의 실재하는 정보를 디자인 요소로 사용하여 컴퓨터에 매개변수로 변환 후 입력, 시각화 하는데 보로노이 이론을 적용하여 정보의 활발한 피드백과 경쟁적 데이터의 선택은 컴퓨터 프로그래밍을 통해 과학적인 방법으로 형태를 도출한다. 형태를 도출하는 과정에 있어 효율적인 정보의 활용은 주어진 정보를 조건화 하고 필요 구성 요소를 데이터화 하여 제어자의 선택에 따라 공간화 진행이 된다.

피드백과 함께 상호작용을 주고받는 많은 것들이 외부의 교란을 받으며 복잡성을 창조하며 외적제한, 적절한 요소, 조건 작용이 상호작용에 의한 선택적 데이터로 공간창조에 있어 알맞은 양식을 찾아가게 된다.

#### (1) 외적 제한과 조건 적용

자하 하디드의 서펜틴 갤러리(Serpentine Gallery)의 임시 야외 설치물인 릴라(Lilas)는 높이 5.5m 텐슬 패브릭(tensile fabric)을 이용해 보로노이 장력을 적용하여 공간화를 하였다. 갤러리 마당의 자연의 요소와 결합을 피하며 꽃잎, 나뭇잎과 같은 식물의 복잡한 자연 기하학을 취하여 중앙을 기점으로 3개의 파라솔이 중첩되어 배열되었다. 정밀한 틈을 통해 공기, 빛, 소리의 모든 것을 섞어 조직하여 열림과 닫힘을 모두 느끼는 공간이 된다. 각 파라솔은 조각적으로 전개되어 모호한 형태를 가지게 되었으며 어디서나 접근 가능한 설치물이 되었다.

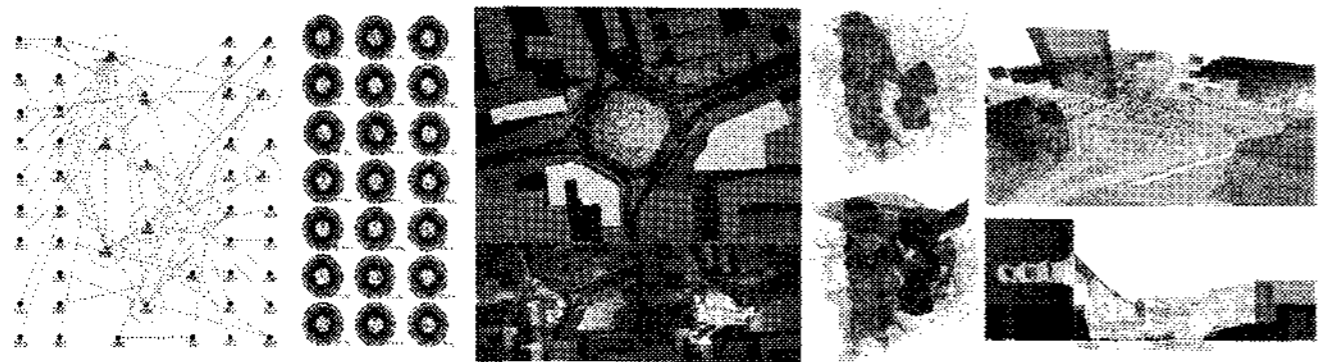


<그림 6> 자하 하디드, 릴라(임시 설치물), 영국, 2007

#### (2) 구성 요소의 데이터화

지-놈(G-Nome)의 넷랩(Net.Lab)은 지역의 환경과 수치에 따라 분화된 공간을 균일하지는 않지만 연속적인 시스템으로 형성하였다. 보로노이 연산을 이용, 개체의 흠어짐과 재응집의 집합 양식을 형성하였는데, 이 사례는 비선형 네트워크 작업이며 분포되는 모양을 가진 패턴 사이의 연결을 시도하였다. 장소와 의뢰인에 의한 정보시스템에 의한 건축이며 장소의 구성요소는 의뢰인의 요구에 따라 입력이 되었다. 영역 중심부를 추적하여

기능 확장용 소프트웨어의 반복적 연산으로 영역의 도표를 만든 후 영역정보를 가진 원·삼각형의 평면으로 동선 체계를 구축 후 반복적 피드백으로 부피 조절을 하였다.

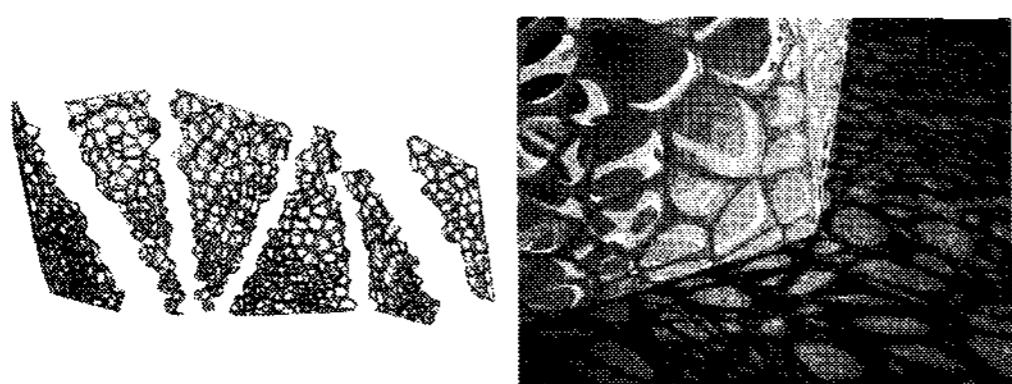


<그림 7> 지-놈, 넷랩(건축 공간의 계획안), 영국, 2006

### (3) 제어자의 선택

자기조직화는 시스템적 사고의 기반 행위로, 적응과정을 통해 본질의 속성을 유지시키기 위해 우위의 조건이 선택되고, 최적으로 적응이 가능한 시스템과 형태 및 구조를 찾아낸다. 그러나 이러한 컴퓨터 프로그래밍의 세포자동자(automaton)적 행위는 포괄적 작업 진행의 응집된 과정으로 제어자의 의도와는 다른 방향으로 전개될 가능성이 있기 때문에, 모든 매개변수의 연산 가능성은 열려있는 상태로 진행을 하되 이성적 설계를 위한 제어자(디자이너)의 개입이 필요하다.

앤드류 쿠들리스의 씨-월(C-Wall)은 2D와 3D의 보로노이 세포 구조를 통해 개발되었다. 두 경우 모두 점의 영역이 특정 점에 더욱 인접한 공간, 또는 세포의 구역을 정하기 위해 활용되었다. 세포는 정형화된 위상 기하학의 제한을 받지 않으므로 그 특징은 틀에 박힌 사각 또는 육각형의 세포보다 더욱 특정한 방식으로 구현되었다. 실제로 디자이너는 보로노이 계산을 담당하는 큐홀(Qhull)<sup>13)</sup>을 라이노(Rhino)에 연결하기 위하여 사용자 정의 스크립트를 작성하였고, 수많은 소규모 보로노이 세포는 대규모 3차원의 세포구조 원형으로 만들어지게 된다.<sup>14)</sup>



<그림 8> 앤드류 쿠들리스, 씨-월(공간 설치물), 영국, 2006

### 3.4. 접근 방법에 따른 적용의 특성 및 분류 및 소결

접근 방법에 따른 사례를 살펴본 결과 보로노이 다이어그램의 자기조직 과정은 모두 조건 요소를 담은 점 데이터의 집합으로부터 시작된다는 것을 알 수 있었다. 그 후 이 보로노이 셀은 다른 세포 집합과의 관계를 맺고 연결점을 찾아내 결합을

하며, 실재적 형태로 드러난다. 동일한 이론의 적용에도 불구하고 상이한 공간이 생성되는 이유는 공유되는 서로의 영역, 강조, 압축이 통합 및 선택되어 생성되기 때문이라 볼 수 있다.

이러한 공간생성의 방법은 디지털 테크놀로지를 기초로 다양한 사고의 도움을 받아 발전하는데, 이것은 현재의 정보사회를 대표하여 공간을 생성하는 사고의 폭을 더욱 넓혀줄 수 있는 가능성을 가지고 있다. 기실은 이러한 수학적 이론이 공간차원으로 전환 번역되는데 있어 완벽한 문제해결의 수단은 아니라는 것이다. 하지만 이러한 자기조직화를 기초로 한 이론을 통한 공간의 형성은 그 과정과 결과에 있어 당위성을 부여하며 모방, 재현이 아닌 창발을 일으키며 형성이 되는 것이다.

발생 방식을 적용하여 요소를 형상화 시킨 경우 순수한 보로노이 다이어그램의 이용은 그것이 가진 본래의 패턴이 도출되어 반복되는 형태를 가진다. 또한 공간 상관성 분석, 구성 요소 분석 등의 환경 분석 기반 매개변수의 추출을 통한 공간화는 임계성의 모호함을 가지며 유기적인 형태의 공간이 되며, 그 요소들이 가진 속성들의 요동으로 개체의 교섭이 일어난 공간이 만들어진다. 다음으로 외적 제한과 조건의 적용, 구성 요소의 데이터화, 제어자의 개입으로 인한 선택적 과정인 정보의 피드백을 통한 선택에 따른 공간화는 디자이너가 의도가 드러난 공간이 형성이 된다. 하지만 주변과의 활발한 피드백으로 연계성이 강한 공간이 된다. 접근 방법에 따른 사례 분석의 소결은 다음과 같다.

<표 6> 보로노이 다이어그램의 적용에 의한 공간 특성 종합분석

적용 방법 분류		분류	작품(작가)	공간 속성 및 특성
발생 방식 적용	요소의 형상화		Smooth 3-D (Andrew Baccon, 2007)	패턴의 반복성
환경 분석 기반 매개변수 추출	공간 상관성 분석		National Kaohsiung Performance Arts Center (Jaha Hadid, 2007)	모호한 임계
	구성 요소 분석		Tulum Museum (Andrew Kudless, 2006)	개체의 교섭
정보의 피드백과 선택	외적 제한, 조건 적용		Lilas (Jaha Hadid, 2007)	동적 연계성
	구성 요소의 데이터화		Net.Lab (G-None, 2006)	계층의 다방향성
	제어자의 선택		C-Wall (Andrew Kudless, 2006)	연속적 진화

## 4. 종합 및 결론

공간의 생성에서 핵심적으로 필요로 하는 것은 형식을 응용하는 융통성 있는 수완뿐만 아니라, 풍부한 지식을 바탕으로 한 영감이다. 디자이너는 날로 변화되는 요구에 끊임없이 적응

13)http://www.qhull.org

14)Digital Diagram, Archiworld, 2007, p.207



하는 동시에 과거에 쌓은 지식과 경험을 받아들여야 한다. 근래의 디지털공간과 형태생성방법에 대한 수많은 연구에서 볼 수 있듯이 공간에 대한 관념의 변화로 컴퓨터 기반의 프로그래밍을 이용하여 설계방법을 개진하였다. 문제의 핵심은 어떻게 영향요소를 다이어그램에 적용하느냐에 있다. 설계에 영향을 주는 여러 요소를 확정된 후, 연결 관계를 찾고 매개변수로의 변환하여 보로노이의 수학적 이론에 적용하여 보로노이가 가진 최소의 규칙으로 자기조직화를 통한 생성형태의 결과를 끌어내는 것이다.

보로노이 다이어그램의 활용으로 공간의 생성에 영향을 주는 근접 요소를 보로노이 계산법에 의한 매개변수와 결합시킬 수 있도록 요소와 개체의 적용에 관한 관계설정을 한다. 앞서 본 사례들은 형태생성과 공간생성에 영향을 주는 매개변수의 동적인 상호작용의 결과이고, 설계과정에서 보로노이 다이어그램의 활용을 통해 유연한 형태는 조직을 이룬 개체들이 간단한 규칙을 지키며 컴퓨터 프로그래밍의 도움을 받아 복잡한 집단의 주어진 규칙에 근거한 형태를 형성한다.

디지털 공간에서의 보로노이 다이어그램의 적용에 관한 사례 분석 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 보로노이 이론이 내재한 자기조직화에 의한 공간화는
- 2) 건축 환경의 정보의 분석과 그러한 정보의 피드백을 통해 공간 사고를 정리하고 생성의 과정에서 수많은 정보의 매개변수를 만들고,
- 3) 선택의 폭을 확장하여 다양한 형태가 나오도록 유인하였으며, 제어자의 의도에 따른 형태 유도 역시 가능하였다.
- 4) 본 연구에서는 컴퓨터 프로그래밍을 통한 자기진화적 설계과정의 유용성을 볼 수 있었다. 그러나 실제적인 공간생성에 연관된 복잡하고 직관적인 문제들을 공간과 연결시키기 위해서는 보다 조직적인 적용구조가 필요하다고 볼 수 있으며, 이러한 연구를 통한 타 학문의 개념들과 공간설계와의 수렴적 활용은 공간생성에 있어 효율적이며 새로운 방법이 될 수 있으리라 본다.

점의 집합과 점이 재구성되는 구조 이론 중 하나인 보로노이 다이어그램을 분석하여 현대 디지털 공간에서 활용함에 있어 다양한 접근 방법과 프로그램의 특성, 장점 및 요구사항을 고려하여 프로그램과 환경의 영역간의 소통을 활발하게 하는 도구가 될 수 있는 가능성을 발견할 수 있었다. 하지만 한정된 함수와 제어자에 의해 주어지는 변수만으로는 자연계와 환경의 모든 요소를 해석하는 것은 무리가 있다. 다만 안정된 영역에 접근하기 위한 수단으로 활용하는 데 있어 보로노이 다이어그램은 발전가능성이 있으며 앞으로 학계 간의 꾸준한 연구가 필요할 것이다.

## 참고문헌

1. Digital Diagram, Archiworld, 2007
2. ETET 새로운 건축다이어그램 1,2, Archiworld, 2007
3. Norbert Bolz, 컨트롤된 카오스, 윤종석 역, 문예출판사, 2000
4. Peter J. Bentley, 디지털 생물학, 김한영 역, 김영사, 2003
5. Rem Koolhaas 외 11인, Anywhere, Cynthia C. Davidson, 현대건축사, 1998
6. 권영걸, 공간디자인 16강, 국제, 2001
7. 최창조, 한국의 풍수사상, 민음사, 1984
8. 유명희, 자기조직화 이론과 현대건축공간구성의 상관성 연구, 홍익대 박사논문, 2004
9. 박정주, 공간디자인에서 디지털 표피 재 조직화, 물리적 구현 방법 연구, 한국실내디자인학회, 17권 2호, 2008.4
10. 윤재은, 디지털공간이 현실공간의 '생성(becoming)'에 미치는 영향에 관한 연구, 한국실내디자인학회, 16권 5호, 2007.10
11. 조준형, 진화이론을 이용한 건축공간계획, 대한건축학회, 11권 12호, 1995.12
12. Christian Friedrich, SmartVolumes-Adaptive Voronoi power diagramming for real-time volumetric design exploration, VSMM 2007, LNCS 4820
13. H. Koivistoinen, M. Ruuska, T. Elomaa, A voronoi diagram approach to autonomous clustering, DS 2006, LNAI 4265
14. Paul Coates, Christian Derix, Generating architectural spatial configurations. Two approaches using Voronoi tessellations and particle systems, 8th Generative Art Conference GA2005
15. 황인, 예술과 과학의 만남, Artist Project, 2005
16. <http://www.calresco.org/sos/sosfaq.htm>
17. <http://www.processing.org/>
18. <http://www.qhull.org/>

<접수 : 2008. 4. 28>