

# 파라메트릭 알고리즘과 모듈 기반의 3D 텍스타일 디자인 유형 분석

## 3D Textile Design Category Based on Parametric Algorithm and Modularity

윤순란, 이화여자대학교 섬유예술전공

Youn, Soonran\_Department of Fiber Art, Ewha Womans University

---

### 차례

- 1. 서론
  - 1.1. 연구배경 및 목적
  - 1.2. 연구방법 및 범위
  
- 2. 파라메트릭 알고리즘 기반의 모듈 조합 프로세스
  - 2.1. 파라메트릭 패턴의 형성 원리
  - 2.2. 모듈, 패턴 형성의 최소 단위
  - 2.3. 모듈의 인터페이스 구조에 기초한 조합방식
  - 2.4. 파라메트릭 알고리즘의 매개변수
  
- 3. 파라메트릭 알고리즘과 모듈 기반의 3D 텍스타일 디자인 유형
  - 3.1. 선형 구조의 입체 패턴, 스트립 모포로지
  - 3.2. 세포 증식형 입체 패턴, 셀 집합 기하구조
  - 3.3. 주름에 기초한 메타소재, 오리가미 테셀레이션
  - 3.4. 틈새에 기초한 메타소재, 키리가미 테셀레이션
  
- 4. 결론 및 제언

References

# 파라메트릭 알고리즘과 모듈 기반의 3D 텍스타일 디자인 유형 분석

## 3D Textile Design Category Based on Parametric Algorithm and Modularity

윤순란, 이화여자대학교 섬유예술전공

Youn, Soonran\_Department of Fiber Art, Ewha Womans University

### 요약

파라메트릭 알고리즘과 모듈 조합 기반의 3D 텍스타일 디자인은 패턴 형성의 절차마다 기하학 벡터를 매개변수로 적용함으로써 표면적 규모의 제한 없이 공간을 채울 수 있는 제조공법이다. 연구의 목적은 그 방법론을 표집 사례의 분류를 바탕으로 파악함으로써, 알고리즘의 차이를 상호비교할 수 있는 유형 분류의 기준을 세우고서 대표적인 선행연구의 방법론을 확보하는 것이다. 본문의 전반부는 문헌 조사를 연구의 방법으로 취해 파라메트릭 구조의 원리뿐 아니라, 알고리즘 기반의 모듈 조합 프로세스에서 핵심적인 구성요소인 모듈, 조합, 매개변수의 개념 및 특성을 고찰한다. 후반부는 당대의 추세를 조망하기 위해 2000년 이후에 발표된 13가지 표집 사례를 스트립 모포로지(선), 셀 집합 기하구조(분자), 오리가미와 키리가미 테셀레이션(면)으로 분류하여 각각의 하위항목별로 패턴형성원리를 분석한다. 선형 구조의 하위항목은 수직선의 수평 병렬, 조인트 어셈블리의 활용, 분절된 선의 교집합 사례다. 셀 집합 기하구조의 하위항목은 구멍의 분포도에 따른 국지적 변화, 다수의 슬롯이 파생하는 패턴의 변주, 모듈 개수 조정에 의한 입체화 사례다. 앞선 두 유형은 독립된 모듈 간의 인터페이스에 의존하는 패턴이지만, 오리가미와 키리가미 테셀레이션을 응용한 메타소재는 주름이나 틈새로 면을 나누어 입체로 도약하는 방식이므로 모듈을 해체할 수 없다. 파라메트릭 디자인은 공간과 관련된 직관의 형식을 통해 부분과 전체의 조화로운 관계를 형성하는 규칙에 관한 패러다임이다. 일련의 알고리즘 체계에 의해 표면적의 증식이나 입체 형태의 변경이 자유롭게 확보되므로 사용자 맞춤형 공간 연출에 효과적인 디자인 전략으로 볼 수 있다. 파라메트릭 테셀레이션의 알고리즘에 기초한 기하학이 제공하는 추상적 계시를 토대로 저마다의 디자인방안을 연구하는 데 보탬이 될 기초자료로 쓰이길 기대한다.

### 중심어

파라메트릭 알고리즘  
모듈 조합  
스트립 모포로지  
셀 집합 기하구조  
3D 텍스타일 디자인

### ABSTRACT

3D textile design based on parametric algorithm and modular configuration is a manufacturing process that can fill space without scale limitations by applying geometric vectors as parameters to each patterning operation. The purpose of the study is to identify the methodologies based on the classification of the case studies to establish a typology for comparing algorithmic differences, and to gain detailed insights from these representative studies. The first half of this paper adopts a literature review as a research method to explore the principles of parametric structures, as well as the concepts and characteristics of modules, configuration and parameter, which are key components in the algorithmic module combination process. In the second half of the paper, 13 exemplary cases presented since 2000 are categorized into strip morphology using linear components, cell aggregate geometry using molecular ones, and origami and kirigami tessellations using planar ones to examine contemporary trends, and the pattern formation principles are analyzed for each subcategory. The subsets of linear structure are horizontal parallelism of vertical lines, using joint assemblies and intersecting segmented lines. The subcategories cell aggregate geometry includes local changes in the distribution of holes, variations in the pattern derived from multiple slots, and three-dimensionalisation by adjusting the number of modules. While the first two rely on interfaces between independent modules, metamaterials using origami and kirigami tessellations leap into 3D form by dividing their surfaces with folds or cracks so that the modules cannot be dismantled. Parametric design is a paradigm about design rules— a harmonious relationship between the part and the whole through spatial intuition. It is an effective design strategy for creating a bespoke space because it allows the surface to grow and the 3D form to change freely through a series of algorithmic systems. This paper could serve as a basis for research into design methods based on the abstract revelations of geometry in the parametric tessellation algorithm.

### Keywords

parametric algorithm  
modular configuration  
strip morphology  
cell aggregate geometry  
3D textile design

본 연구는 2021년도 한영장학 재단 학술연구비 지원과제임

## 1. 서론

### 1.1. 연구배경 및 목적

기하학은 도형(shape)과 형태(form)의 속성, 계측, 관계에 관한 추상적 계시를 통해 미지의 세계를 탐험할 수 있는 이동수단이다. 그 응용 분야에서 경험이나 인식의 한계를 초월한 고도의 추상화가 컴퓨터의 활용으로 증폭되고 있다. 파라메트릭 알고리즘과 모듈 기반의 3D 텍스타일 디자인은 디지털 프로그래밍이 산출한 서피스디자인의 혁신적인 성과 중 하나다. 패턴 형성의 절차마다 기하학 벡터를 매개변수로 적용함으로써 표면적 규모의 제한 없이 공간을 채울 수 있는 제조공법이기 때문이다. 텍스타일이 전통적인 기능을 초월하여 하이텍(high tech) 도구로 진화하는 추세에 힘입어서 공간디자인뿐 아니라 의료기기, 생체모방 로봇과 같은 첨단기기 개발 분야를 중심으로 3D 텍스타일의 구조적 특성에 기초한 메타소재 연구가 활발히 진행 중이다. 본 연구에서는 다양한 공간 배치와 사용자 맞춤형 환경을 조정할 수 있는 효과적인 방법론으로서 섬유적 적용 방식에서 다변화를 피하고 있는 공간디자인 분야에 초점을 맞추어 2000년 이후의 선행연구 업적을 살펴볼 것이다.

연구의 목적은 파라메트릭 시스템의 기하학적 질서와 아름다움을 3차원으로 형상화하는 텍스타일 디자인의 방법론을 표집 사례의 분류를 바탕으로 파악함으로써, 알고리즘의 차이를 상호 비교할 수 있는 유형 분류의 기준을 세우고서 대표적인 선행연구의 방법론을 확보하는 것이다. 몇 가지 기본 도형을 바탕으로 기하학 패턴의 범주를 넓히면서 차원을 도약하는 방식을 탐구하는 동시대 3D 텍스타일 디자인 분야의 기초자료를 마련하는 데 의의를 둔다. 파라메트릭 패턴을 구성하는 요소 간의 일관적이고 논리적인 체계를 구상에 적용한다면 매개변수에 따른 규칙성의 차이와 표현 가능한 경우의 수를 예측할 수 있으므로, 그중에서 가장 효율적인 이미지와 제작 방식을 선택할 수 있을 것이다.

### 1.2. 연구방법 및 범위

상술한 목적에 상응하도록 연구의 내용은 크게 두 영역으로 나누어 구성한다. 본문의 전반부는 문헌 조사를 연구방법으로 취해 파라메트릭 구조의 원리뿐 아니라 알고리즘 기반의 모듈 조합 프로세스에서 핵심적인 구성요소인 모듈, 조합방식, 매개변수의 개념 및 특성을 고찰한다. 이어지는 후반부는 표집 사례를 네 가지의 집합인 스트립 모포로지(선형), 셀 집합 기하구조(세포형), 오리가미 테셀레이션과 키리가미 테셀레이션(평면형)으로 분류하여 각각의 하위항목별로 패턴형성원리를 분석한다. 표집 대상의 범위는 당대의 추이를 조망하기 위해 2000년 이후에 발표된 선행연구에 한정한다. 각 유형에 속하는 하위항목은 전형적인 사례 하나와 다양성을 산출하는 이례적인 두세 가지 사례들로 구성한다. 선형 구조의 하위항목은 수직선의 수평 병렬, 조인트 어셈블리의 활용, 분절된 선의 교집합 사례다. 세포증식형 기하무늬의 하위항목은 구멍의 분포도에 따른 국지적 변화, 다수의 슬롯이 파생하는 패턴의 변주, 모듈 개수 조정에 의한 입체화 사례다. 앞선 두 유형은 독립된 모듈 간의 인터페이스에 의존하는 패턴이므로 해체와 재조립이 수월하다. 반면, 오리가미와 키리가미를 응용한 메타소재는 주름이나 틈새로 면을 나누는 방식이므로 모듈의 해체가 불가능하다. 이상 네 가지 유형의 방법론을 설명하기에 앞서, 파라메트릭 알고리즘 기반의 모듈 조합 프로세스에 관한 이론적 고찰 내용을 개괄적으로 서술 하겠다.

## 2. 파라메트릭 알고리즘 기반의 모듈 조합 프로세스

### 2.1. 파라메트릭 패턴의 형성 원리

파라메트릭 구조는 패턴을 형성하는 최소 단위인 모듈 간의 인터페이스에 의존하면서 무한확장을 향하여 연속성과 일관성 있는 기하학적 전개를 생성하는 시스템이다. 괴테(Johann W. Goethe, 1796)의 형태와 형성의 관계성에 관한 수학적 이론을 바탕으로 수학자 톰슨(D'Arcy W. Thompson, 1860-1948)이 파라메트릭 연관 논리의 토대를 마련하였다. 그는 다차원 공간에서 국지적이거나 전역적으로 확장과 변형을 추동할 수 있는 데카르트 좌표계(Cartesian

coordinate system)를 궁극적인 파라메트릭 도구로 정의하고, 내력과 외력에 연동하여 형태가 만들어지는 매개변수 방정식이 제너레이티브(generative) 디자인이 될 수 있음을 시사하였다(Menges & Ahlquist, 2011, p.19). 21세기의 패러다임 중 하나인 제너레이티브 디자인은 생성이 통합과 형성 과정을 거쳐서 형태의 동태(behavior)를 특정 짓는 기하학적 시스템에 기초한다. 여기에서 주지할 점은 ‘생성(generator)’을 패턴의 형성이나 물리적인 자기 조직화(self-organization)의 속성으로서뿐 아니라, 동태와 기능의 요인으로 이해해야 한다(Menges & Ahlquist, 2011, p.24)는 점이다. 제너레이티브 디자인에서 생성될 요소가 시스템 속에서 무엇으로 구성되고 어떻게 자라나며 어떤 역할을 충족시키는가의 맥락을 결정짓는 일이 중요하다.

제너레이티브, 즉 형태생성 프로세스의 대표적인 유형이 파라메트릭 구조다. 그것의 핵심적인 메커니즘은 모듈의 축적, 모듈 유닛 간의 상호작용, 시스템의 재귀적(recursive) 형성, 반복에 기초한 패턴의 확장, 매개변수의 차이가 낳는 다양성 등이다. 파라메트릭 구조는 자연계의 유기적인 조성 양태, 즉 다종다양한 차이의 발생 및 구성요소 간의 상호작용 등과 같은 원칙을 기하학의 메커니즘에 대입하여 구축한다. 그런 패턴의 본질은 어떤 귀결된 지점이 아닌, 성장의 이미지를 표상하는 기표로 이해해야 한다.

파라메트릭 디자인은 테셀레이션 패턴을 생성하는 규칙과 일련의 매개변수 입력값을 통해 결과물을 산출하는 방법이며 단계식 절차인 알고리즘에 기반한다(Jabi, 2013, p.22). 알고리즘은 패턴을 구성하는 여러 요소 간의 상관관계를 표준화하여 단계별로 입력한 값을 출력값으로 변환하는 방법론이다. 다시 말해 알고리즘은 가능성의 범위를 하나의 시퀀스 세트(sequence set)로 구성하기 위해 연산 도구(operational mean)로 만든 절차를 뜻한다. 건축가 테르지디스(Kostas Terzidis, 2003)에 따르면 알고리즘 설계의 전략은 반복적인 패턴, 보편적 원리, 교체 가능한 모듈, 귀납적 연결 방식 등은 어떠한가 하는 것을 조율하는 것이다(Menges & Ahlquist, 2011, p.94). 파라메트릭 알고리즘과 모듈 조합 기반의 3D 텍스타일 디자인에서 시퀀스 세트 설계의 핵심 요소는 최소 단위인 모듈, 다수의 모듈을 연결하는 물리적인 조립방식, 패턴 형성을 위한 모듈 조합의 맵핑에 관여하는 매개변수 등이다.

## 2.2. 모듈, 파라메트릭 패턴의 최소 단위

‘계수’를 뜻하는 라틴어 ‘모듈러스(modulus)’에서 유래한 단어인 모듈(module)은 표준화된 최소 단위나 유닛을 가리키는 용어이며 기하학 패턴의 양태를 좌우하는 핵심 요소다. 유클리드 기하학 테셀레이션의 모듈은 평면 다각형(polygon)이 기본이다. 평면 테셀레이션 형성의 메커니즘은 패턴의 최소 단위인 모듈이 상하좌우로 90°나 180°로 회전해도 등거리변환에 따른 대칭이동이 가능하다는 사실에 기초한다. 정삼각형, 정사각형, 다이아몬드형, 정육각형 격자(grid)구조가 가장 기본적인 테셀레이션 패턴이다. 테셀레이션을 형성하는 메커니즘에서 주지할 점은 다각형의 각 변이 모듈 병렬 전개 방향성을 결정짓는 요소라는 사실이다. 예를 들어 정사각형은 상하좌우 네 방향으로 모듈이 증식할 수 있는 도형이다. 모듈에 내접하는 다각형이 상기한 네 가지에 속하고, 그 포맷 상에 연결 장치가 위치하는 조건이라면 원형, 두 가지 이상의 다각형을 조합한 기하학 형태, 유기적인 곡선으로 그린 자유 형태도 테셀레이션의 최소 단위인 모듈이 될 수 있다.

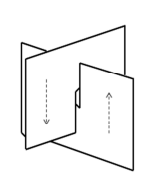
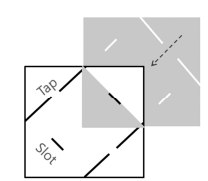
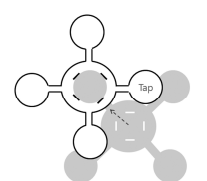

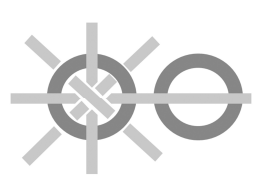
## 2.3. 모듈의 인터페이스 구조에 기초한 조합방식

접착제나 바느질과 같은 추가 공정 없이 다수의 모듈을 물리적으로 연결하려면 상호의존적인 ‘탭(tab)’과 ‘슬롯(slot)’을 모듈 디자인에 추가해야 한다. 결쇠 구실을 하는 탭은 ‘크램프(cramp)’로, 고정쇠 구실을 하는 슬롯은 ‘슬릿 slit)’으로 불리기도 한다. 모듈 간의 인터페이스 표준화에 따른 ‘조합’은 최소 단위인 ‘모듈’과 함께 3D 텍스타일 디자인의 핵심적인 원리이자 도구다. 특정한 인터페이스 규칙에 따라 모듈을 조합하면 다양한 변수를 통해 패턴을 구성할 수 있다. 그러나 모듈의 형태가 이미 정해진 상태이기 때문에 패턴 변수의 폭은 한정된 범위



내에서만 가능하다. 다양성 비율의 증가는 모듈의 가짓수로부터 가장 큰 영향을 받는다. 모듈의 종수가 두 가지 이상으로 늘어나면 패턴조합의 가능지수가 획기적으로 증가한다. 그러나 모듈 간의 호환성을 유지하기 위한 인터페이스 설계의 난이도가 동반 상승하는 단점이 있다. 조립공정의 단순화를 지향하기 위해 접착제나 부자재를 적용하지 않고 모듈을 조립하는 간결한 방식에는 앞서 설명한 탭과 슬롯을 포함하여 <Table 1>과 같이 5가지의 기본 유형이 있다. 첫 번째 유형인 슬라이스폼(sliceform)은 두 개의 슬릿을 위아래로 맞물리는 원리이며 스트립 형태의 모듈을 그물망 구조로 조합할 때 흔히 쓰인다. 다섯 번째 유형인 인터레이싱(interlacing)은 플레이팅(plaiting) 직조기법의 원리에 기초하며 탭과 슬롯이 활용되지 않는 유일한 조립방식이다. 전통적인 유클리드 기하학의 평면 테셀레이션의 원칙과 달리, 모듈 조립으로 만드는 3D 파라메트릭 텍스타일 디자인에서는 틈새가 개입하고 모듈 간의 부분적인 겹침(overlapping)이 발생하는 차이가 있다.

<Table 1> Examples of Assembly Joint Type

| 1) 슬라이스폼  | 2) 내장형 탭 & 슬롯   | 3) 돌출형 탭 & 슬롯   | 4) 탭  | 5) 인터레이싱  |
|---|---|---|---|---|
|  |  |  |  |  |

#### 2.4. 파라메트릭 알고리즘의 매개변수

파라메트릭 디자인에서 알고리즘 설계의 핵심은 파라미터(parameter), 즉 기하학적 매개변수의 설정이다. 그리스어 ‘파라(para)’와 ‘메트론(metron)’의 합성어에서 유래한 ‘파라미터’는 하나의 집합 내에 존재하는 관계의 양상, 즉 시스템이나 장치의 주요 특성을 규정짓는 일련의 입력요소를 일컫는다. 파라메트릭 디자인에서 기본적인 매개변수는 선과 꼭짓점(vertex)의 관계, 모듈의 형태와 크기 및 개수, 유닛을 형성하는 모듈의 가짓수와 정렬 방식, 격자구조의 열과 행의 수 등과 같은 기하학적 벡터(vector)다. 균일한 모듈이더라도 매개변수 세트의 여러 버전을 통해 프로토타입(prototype)을 변주할 수 있다. 또한, 컴퓨터상의 패턴 설계 외에도 추가로 고려해야 할 매개변수로 재료의 물성이 있다. 재료의 두께, 탄성, 마찰, 강도 등과 같은 물리적인 속성 및 절단면의 균질 정도 등이다.

표집 사례의 분류는 모듈 조합에 의해 생성되는 구조물, 즉 체(體)가 점(點)이나 선(線) 또는 면(面)에서 출원하는지에 따라 세 집합으로 나누었다. 점은 0차원의 개념이 아닌 세포의 차원으로 정의하여 대상을 분류하고, 선은 1차원이 아닌 띠 형태의 선형 구성요소까지 범위를 확장하였다. 기하학 응용 분야에서 전자는 ‘셀 집합 기하구조(cell aggregate geometry)’, 후자는 ‘스트립 모폴로지(strip morphology)’로 통용된다. 면의 경우는 패턴을 형성하는 선을 따라 접거나 분절된 절개선을 내어 다면체(polyhedral)를 형성하는 두 가지 방법론인 오리가미 테셀레이션과 키리가미 테셀레이션으로 양분하였다.

스트립 모폴로지는 띠 모양의 모듈을 조립하는 형태 연구를 일컫는 용어다. 그 기본형은 보통 중력작용에 순응하도록 수직선의 수평 병렬 방식을 따른다. 스트립 개체가 독립되어 있으므로 구조적인 안정성은 취약하다. 스트립을 90°로 엇갈려서 가위집끼리 맞물리는 형식은 그물망 구조를 형성한다. 스트립의 폭이 일정하지 않게 곡선으로 외곽선을 처리하면 안정적으로 맞물린 그물망 격자구조에 곡면을 도입할 수 있다. 스트립이 나란히 정렬하며 탭과 슬롯으로 맞물리면 표면적이 넓은 평면이나 입체로 차원이 전이될 수 있다. 본문에 수록한 방법 외에도 플레이팅 직조기법에 기초하면서 출력값에서 선적 특성이 드러나도록 틈새를 벌려 스트립 모듈을 조립할 수 있다.

셀 집합 기하무늬는 선행연구 사례에서 가장 분포도가 높은 유형이다. 테셀레이션 구성에 가장

적합한 양식이며 파라메트릭 패턴 고유의 확장성이 우수하여 다양한 표면적의 변주로 공간을 채울 수 있다. 다각형에 기초한 모듈의 형태가 패턴의 양태를 결정짓는 핵심 변수로 작용한다. 인접한 모듈끼리 탭과 슬롯의 위치가 서로 정확히 일치해야 한다. 탭과 슬롯이 맞물리면서 추가로 생성되는 도형이 패턴에 더해지는 특징이 있다. 평면 전개와 입체 전개의 차이는 유닛을 형성하는 모듈의 개수에서 발생한다. 평면 전개에 필요한 모듈의 수보다 적은 수가 모듈 유닛으로 조립될 경우 그 중심부에 음각이, 외곽에는 양각이 형성된다.

‘오리가미(origami) 테셀레이션’과 ‘키리가미(kirigami) 테셀레이션’은 공학 분야에서 메타소재 개발에 적극적으로 활용하는 제조공법이다. 접힘과 펼침에 따라 부피 조정이 가능한 데다가 주름과 틈새로부터 탄성이 발생하는 물리적 특성을 갖는다. 틈새나 주름이 가동하는 유연성(fluidity)의 경우, 조류의 움직임에 본뜬 플로킹 패턴(flocking pattern)에서 각각의 객체가 인접한 객체의 움직임에 따라 점진적으로 연쇄반응을 형성하는 현상이 가장 효과적으로 발현된다. 상술한 네 가지 유형에 속하는 하위항목들의 알고리즘을 단계별 입력값과 함께 출력값의 예시를 연계하여 정리하면 <Table 2>와 같다.

<Table 2> A Taxonomy of Parametric Algorithms in 3-D Textile Design

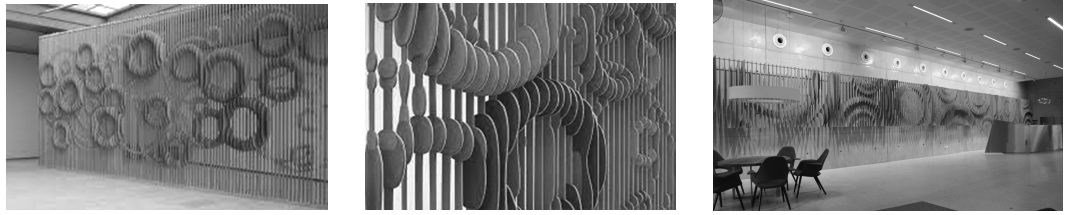
| 파라메트릭 알고리즘의 입력값 Input      |  |                   |                        |                  |  |   | 출력값 Output     |
|----------------------------|--|-------------------|------------------------|------------------|--|---|----------------|
| 구성요소                       | 분류   | 단위조합 형식           | 모듈의 형태                 | 연결 장치 형식         | 테셀레이션 형식                                 | 매개변수(parameter)   | 예시사례 번호        |
| 선형<br>Linear Components    | 스트립<br>모포로지<br>Strip Morphology            | 수직선의 수평<br>병렬     | 직선형, 곡선형               | X (상단에<br>고정축)   | 수평 병렬                                    | 스트립의 형태, 길이,<br>너비, 간격  | <Figure 1>     |
|                            |  | 인터로킹<br>슬라이스폼     | 직선형, 곡선형               | 인터로킹<br>(가위집)    | 상하좌우 대칭,<br>회전 대칭                        | 스트립의 형태, 조인트<br>모양과 위치  | <Figure 2>     |
|                            |  | 상하좌우/대각선<br>정렬    | 직선형, 곡선<br>형,<br>자유 형태 | 인터로킹,<br>바느질, 기타 | 수평/수직 병렬,<br>상하좌우 대칭,<br>회전 대칭           | 스트립의 형태,<br>교차점의 정렬 방식  | <Figure 3>     |
| 세포형<br>Cellular Components | 셀 집합<br>기하무늬<br>Cell Aggregate<br>Geometry | 평면 전개             | 원형, 다각형                | 탭 & 슬롯           | 상하좌우 대칭,<br>회전 대칭                        | 모듈의 형태와 개수,<br>연결거리의 개수와<br>위치                                | <Figure 5-6>   |
|                            |  | 입체 전개             | 원형, 다각형,<br>자유 형태      | 탭 & 슬롯           | 상하좌우 대칭,<br>회전 대칭                        | 모듈의 형태와 개수,<br>연결거리의 개수와<br>위치                                | <Figure 7>     |
| 평면형<br>Planar Components   | 오리가미 접기<br>Origami Folding                 | 아코디언, 격자<br>패턴    | 다각형                    | X                | 상하/좌우 대칭,<br>상하좌우 대칭,<br>회전 대칭,<br>등거리변환 | 기하학적 벡터(접기<br>선의 길이, 위치, 간격,<br>교차 선의 각도 등),<br>소재 두께, 경첩의 역할 | <Figure 11-13> |
|                            |  | 모듈 조합             | 다각형                    | 삽입(tucking)      | 상하/좌우 대칭,<br>회전 대칭                       | 삽입 위치, 모듈 유닛의<br>정렬 방식  | <Figure 14>    |
|                            | 키리가미<br>Kirigami                           | 수직/수평/<br>대각선의 병렬 | 직선/곡선                  | X                | 상하좌우 대칭,<br>회전 대칭                        | 기하학적 벡터<br>(절개선의 길이, 위치,<br>간격 등), 접기 추가<br>여부                | <Figure 15>    |
|                            |  | 타일링 패턴            | 다각형                    | X                | 상하좌우 대칭,<br>회전 대칭                        | 기하학적 벡터,<br>팽창 방향   | <Figure 16-17> |

### 3. 파라메트릭 알고리즘과 모듈 기반의 3D 텍스타일 디자인 유형

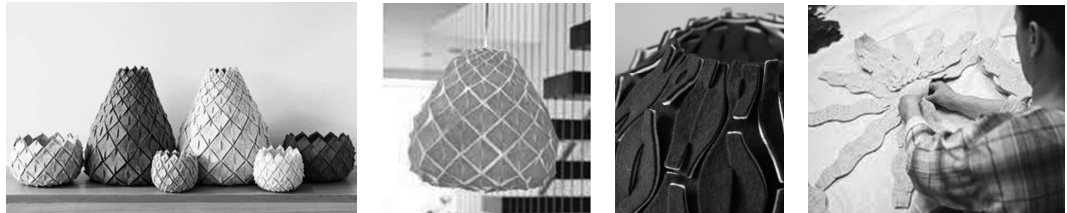
#### 3.1. 선형 구조의 입체 패턴, 스트립 모포로지

스트립 모포로지(strip morphology)는 폭이 좁고 길이가 긴 띠 형식의 선형 재료를 활용하여 기하학 패턴의 구성원리에 따라 구조적으로 효율성이 높고 미학적으로 복잡한 형상을 조성하는 디자인 방법론을 일컫는 용어다. 매개변수는 스트립의 길이와 폭, 정렬 방식, 연결 방식

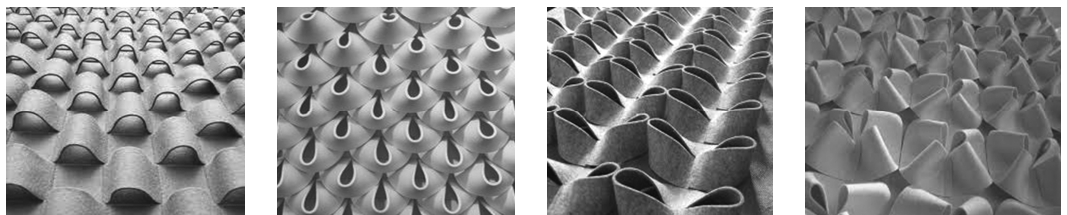
등이다. 예시로는 가장 전형적인 유형인 수직선의 수평 병렬 사례, 두 가지 이례적인 방식으로 조인트 어셈블리를 추가하여 평면에서 입체로 차원 전이가 발생하는 사례와 분절된 선의 교집합으로써 파라메트릭 테셀레이션을 형성하는 사례를 살펴보겠다.



<Figure 1a-1d> May Bente Aronsen, *Kunsterforbundet*, 2011(1a & 1b), *Ringvirkninger*, 2009(1c)



<Figure 2a-2d> CraftedSystem(Aurelie Tu & YWCA), *Textile Product Design, wool felt*, 2010



<Figure 3a-3d> Anne Kyyro Quinn Studio, *Sound Absorbing Panels, wool felt*, 1999-present

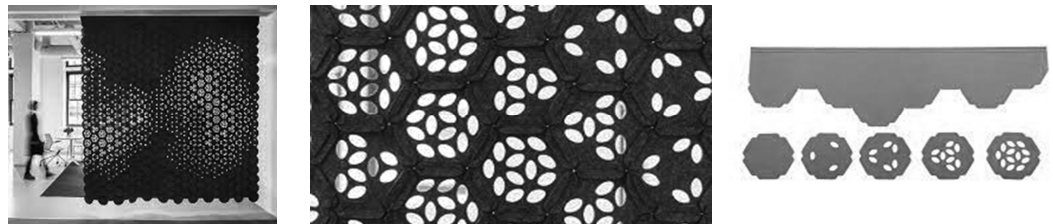
아론센(May Bente Aronsen, 1962-)은 스트립과 틈새의 조합이 주변 환경뿐 아니라 시점의 이동과 상호작용하도록 ‘사라짐의 속성’을 줄곧 탐구해온 노르웨이 텍스타일 디자이너이다(Holmen, 2012, p.49). <Figure 1>은 수직선의 수평 병렬 사례다. 3D 프로그램상의 알고리즘 입력값에 따라 수직선의 폭을 부분적으로 조정한 후, 스트립의 절단면이 정면을 향하도록 수평 정렬하여 상단부에서 일정한 간격으로 고정해 놓은 것이다. 굵은 선으로 돌출한 부위에 기하학적 패턴이 생성되는데, 스트립 사이로 벌어진 틈새 때문에 정면에서 바라보면 양감이 사라지고 수직선이 일렬로 나타나지만, 측면 방향으로 바라보면 시점이 멀어질수록 양감이 더욱 선명하게 두드러진다. 이러한 옵아트(optical art) 효과는 색채대비로 더욱 강화된다. 회색과 붉은색 부직포가 양면으로 부착된 띠가 병렬된 양태이므로 한 방향에서 바라보면 고채도의 원형 패턴이 나타나지만, 다른 방향에서 보면 1a나 1c처럼 무채색으로 채도가 낮아져 틈새 너머의 공기와 시멘트 벽면에 스트립 행렬이 뒤섞이는 효과가 나타난다.

크래프트시스템(CraftedSystem)은 2010년 당시 미국 포틀랜드 지역에서의 사회사업을 목적으로 오렐리 투(Aurelie Tu, 출생 연도 미상)에 의해 설립되었던 디자인 스튜디오이다. 그는 YWCA 여성보호소와의 협업을 시작으로 피어(P:EAR) 입주 청소년(15-24세)의 재활을 돕는 프로그램을 실행하여 주목을 받았다(Turner, 2018). <Figure 2>는 조인트 어셈블리를 활용하는 이례적인 알고리즘 사례이다. 패턴형성원리는 탭과 슬롯이 포함된 지그재그형 또는 과장 곡선형 스트립에 기초한다. <Figure 2d>처럼 바닥 면의 원둘레를 둘러싸고 방사형으로 뻗은 스트립을 조립하고 나서 나란히 정렬한 스트립끼리 순차적으로 연결하면 부드러운 곡면의 용기 형상이 손쉽게 완성되므로 입주자라면 누구든 참여하여 경제적 소득을 얻을 수 있었다. 또한, 수공예의 즐거움과 성취감이 주는 정서적 치유가 커서 재활 프로그램의 취지에 부응하는 성과를 얻기도 했다. 퀸(Anne Kyyro Quinn, 출생 연도 미상)은 울 펠트와 분절된 선의 교집합을 활용하는 파라메트릭

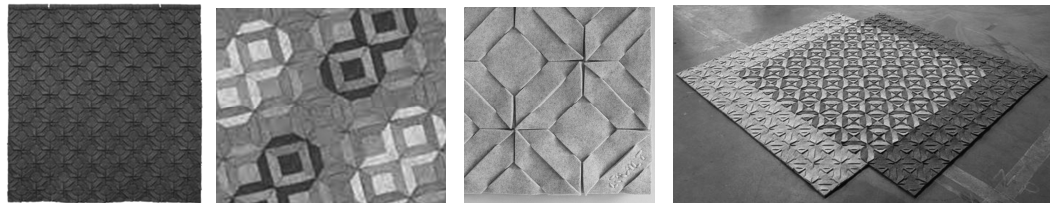
릭 텍스타일 디자인의 선구자 중 한 사람이다. <Figure 3a>는 수평 정렬한 스트립을 바느질선이 수직으로 가로지르면서 곡면과 평면이 교대로 분포하게 만든 사각 격자 패턴이다. <Figure 3b>는 U자형으로 분절된 스트립 행렬을 마름모의 면과 면이 만나도록 대각선 방향으로 쌓아 올린 다이아몬드 격자 패턴이고 <Figure 3c>는 U자형 스트립의 거울 이미지를 수평/수직 방향으로 병렬한 패턴이다. <Figure 3d>는 직사각형 스트립을 삼 등분한 지점과 양 끝점을 한꺼번에 모아서 꿰매 만든 사각 격자 패턴이다. 분절된 선을 바탕 면 위에 바느질로 고정하는 방식이므로 모듈의 재조립을 위한 해체가 불가능하다. 하지만 부분에서 전체로의 도약이 가능하도록 컴포넌트(component) 벽 패널 형식으로 디자인함으로써 주어진 공간에 따라 사각 격자 패널의 자유로운 조합이 가능하다.

### 3.2. 세포 증식형 입체 패턴, 셀 집합 기하구조

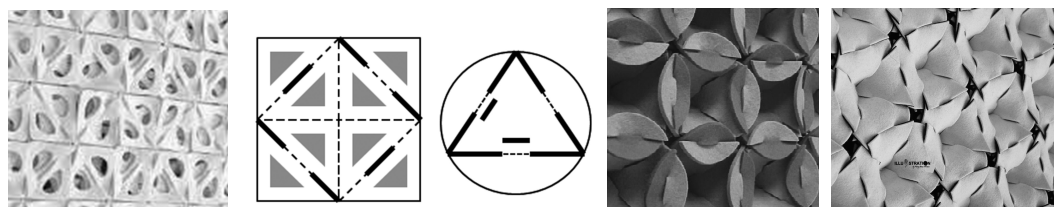
영어에서 단어 ‘세포(cell)’는 유기체의 기본 단위인 살아 있는 세포를 지칭하지만, 세포자동자(cellular automaton)의 기본 단위인 컴퓨터의 셀을 의미하기도 한다(Gamwel, 2016/2019, p. 321). 그리하여 셀 집합 기하구조(cell aggregate geometry)는 서로 같거나 유사한 모듈을 조합하여 시각적으로 복잡한 패턴을 만드는 디자인 방법론을 일컫는 용어로 쓰인다. 집합요소를 생성하는 알고리즘의 원칙은 보통 격자구조에 기초한 단계식 모델링 및 디지털 제조공법을 토대로 세워진다. 집합요소의 생성 시에 개별 단위인 모듈의 모양과 크기, 조립에 필요한 연결구조, 틈새의 배치 등과 같이 기하학적 관계를 신중히 고려하여 패턴을 설계해야 한다. 텍스타일 디자인 분야에서 입체적인 셀 집합 기하구조는 모듈 생산의 속도와 수량에서 탁월한 진척을 이룬 레이저 커팅 기술의 상용화에 힘입어 2000년대 이후 활발히 연구가 진행 중이다. 패턴 형성의 전통적인 방식인 테셀레이션에 기초한 사례들을 수집한 후, 다양성을 향해 분화된 길로 나아갈 수 있는 세 가지 유형을 추출하여 아래와 같이 수록하였다. 타공(engraving) 기법으로 만들어낸 구멍의 분포도를 매개변수로 활용하는 사례, 연결 장치인 슬롯을 다수로 포함한 모듈을 활용함으로써 산출 가능한 패턴의 변수율을 높이는 사례, 평면 전개에 요구되는 모듈 개수보다 적은 수의 조합에 따른 입체 패턴화 사례이다.



<Figure 4a-4c> *Gensler & Flizfelt, Link, acoustic wall covering, wool felt, 2015*

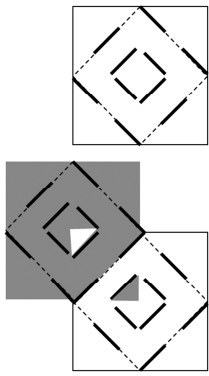


<Figure 5a-5d> *Qvilt by Alex Feenstra, Modular Felt Rugs, merino wool felt or industrial felt, 2017-present*



<Figure 6a-6d> *Illu Stration, Mary-Ann Williams, acoustic wall panel, wool felt, 1999-present*

정육각형은 정삼각형과 원형의 구조적 우월성을 제공할 뿐 아니라 평면 테셀레이션 형성에서 효율성이 가장 뛰어난 도형이므로 셀 집합 기하구조에서 널리 쓰인다. <Figure 4>는 구멍의 분포도에 따른 국지적 변화 사례다. 육각형 모듈은 균일한 형태를 가지되 내접하는 구멍의 개수라는 매개변수를 객체에 추가함으로써 빛의 투과율 면에서 국지적인 변화를 생성할 수 있게 한다. 육각형 모듈은 0에서 80%까지 5단계의 투명도를 나타내도록 CNC로 제작된 것이다. 공간 분할 시에 시선의 이동을 부분적으로 연결하거나 차단하도록 가림막의 좌표 구성에 따라 투명도의 값을 점진적으로 맵핑하고 나서, 이 값을 바탕으로 5가지 모듈의 위치를 설정할 수 있다. 셀 집합 기하구조에서는 모듈의 절단면이 깔끔하게 처리되고 잦은 조립과 해체에도 내구성이 약해지지 않도록 고밀도의 부직포가 주로 사용된다. 울 펠트는 생분해성(biodegradable)이고 재활용이 가능한 친환경 소재인 데다가 내화성, 난연성, 발수성, 방오성이 우수하여 인테리어 디자인 용도에 적합한 특성을 갖는다.



<Figure 7> Module Diagram of <Figure 5>

<Figure 5>는 다수의 슬롯이 과생하는 패턴의 변주 사례다. 모듈 유닛은 중앙에 놓인 정사각형의 꼭짓점마다 정사각형이 중첩되며 만들어진다. 모듈에 3쌍의 슬롯이 위치하기 때문에 탭을 끼워 넣는 시퀀스에 따라 사각 격자구조의 여러 변주를 유닛에서 생성할 수 있다. <Figure 7>과 같은 시퀀스로 탭을 삽입할 경우 <Figure 5c>가 반대쪽 면에서 나타난다. 이 두 가지가 기본형이다. 전자는 정사각형 내부에 네 개의 정삼각형으로 분할된 또 하나의 정사각형이 등거리로 나타난다. 후자는 정사각형의 변마다 사다리꼴 사각형이 둘러싼 모듈 유닛이 만들어진다. 주변부 모듈이 가운데 모듈에 겹쳐지는 위치가 위냐 아래냐의 여부에 따라 발생하는 차이이다. 중앙의 사각형에서 대각선으로 마주 보는 꼭짓점에 있는 모듈을 한 쌍으로 묶어 한 쌍은 위에서, 반대쪽 쌍은 아래에서 겹쳐 주변부 모듈을 연결할 수도 있다. 그러면 정삼각형으로 분할된 정사각형의 변마다 사다리꼴 사각형이 둘러싸는 패턴이 앞과 뒤에서 똑같이 나온다. 이러한 여러 가지 시퀀스에 더해 <Figure 5b>나 5d와 같이 두 가지 이상의 색채대비를 패턴에 적용할 경우 산출 가능한 경우의 수가 급격하게 증가한다.

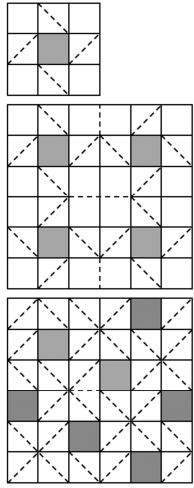
윌리엄스(Mary-Ann Williams, 출생 연도 미상)는 생활공간의 소음을 흡수하고 공기 중의 폼알데하이드와 같은 유해물질을 필터링하기 위한 친환경 시스템을 텍스타일 디자인에 적용하는 대표적인 디자이너이다. <Figure 6>은 모듈 개수 조정에 의한 입체화 사례다. 패턴 형성의 알고리즘은 다음과 같다. <Figure 6a>는 정사각형에 내접하는 정사각형의 각 변에 탭과 슬롯을 평행하도록 넣은 한 가지 모듈로 조립한 삼각 격자구조다. 내접 사각형의 변마다 거울 이미지의 구멍이 총 여덟 개 뚫려 있어 중첩에 의한 깊이감이 표면에 추가된다. <Figure 6c>는 원형 모듈에 내접하는 정삼각형의 변에 <Figure 6b>와 같이 탭과 슬롯이 위치하는 모듈을 사용한다. 두 개의 모듈을 연결하면 공유 경계선을 중심으로 타원형이 겹으로 생성되면서 표면 질감이 풍부해진다. 6개의 모듈 유닛을 회전 대칭으로 조립한다면 2차원의 육각형 유닛이 만들어진다. 그러나 <Figure 6c>에서처럼 4개의 모듈만으로 유닛을 조립하면서 피라미드형 유닛의 밑면을 반대편에서 연결하면 앞뒤가 서로 다른 입체 패턴이 생성된다. <Figure 6d>는 6c와 같은 피라미드형 유닛이 정렬하는 사각 격자구조이지만, 앞선 사례와 다르게 탭과 슬롯을 모두 한 방향에서만 연결한 패턴이다. 사진은 마치 계란판처럼 움푹 팬 부분이 나타나는 뒷면을 촬영한 것이다.

### 3.3. 주름에 기초한 메타소재, 오리가미 테셀레이션

신축성이 없는 평면 소재를 형태 변경이 가능한 3차원 구조물로 변환하는 프로세스가 최근 들어 제조공법에서 흥미진진한 패러다임으로 부상하고 있다. 팽창과 수축뿐 아니라 곡면 생성이 손쉬운 오리가미와 키리가미의 메커니즘이 그와 같은 메타소재 설계의 대표적인 해법으로 꼽힌다. 접두사 메타(meta)는 ‘most effective tactic available’의 약칭으로, 그것이 수식하는 어떤 영역에서 한 차원 더 높은 기술이나 대안을 의미하는 수식어이다.

오리가미 테셀레이션(origami tessellation)은 정확한 계산과 엄밀한 규칙에 따라 한 장의 종이를 접어 기하학 패턴을 만드는 기법이다. 유클리드 기하학의 라브스 타일링(Laves tiling)을

다면체의 입체적인 표면(polyhedral surface)으로 변환하는 기하학 방식에 중점을 둔다는 점에서 일반적인 차원에서의 종이접기와 구별된다. ‘오리가미’라는 용어는 1991년 일본의 수학자 후지타 후미야기(藤田文章, 1924-2005)가 6개의 오리가미 공리를 발표하여 세간에 널리 알려지면서 정착되었다. 일본어 ‘오리(おり, 접기)’와 ‘가미(가미, 종이)’의 합성어인 오리가미는 한 장의 종이를 자르거나 이어붙이지 않고 패턴을 접을 수 있어야 하며, 접힘과 펼침의 반복 적용이 모두 가능해야 한다.

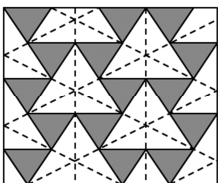


<Figure 8> Mirror Shifting & Glide Reflecting in Square Waterbomb Tessellation

오리가미에서 가장 두드러진 특질은 주름(pleats)이다. 양각으로 솟아오르게 접힌 주름은 ‘마운틴 폴드(mountain fold)’, 음각으로 패이게 접힌 주름은 ‘밸리 폴드(valley fold)’라 부른다. 직선 주름의 기본 유형은 <Table 3>에서 좌로부터 다섯 가지이다. 테셀레이션 형성 시에는 두 가지 이상의 주름 기법을 상하좌우 또는 회전 대칭으로 반복 조합하면서 선의 교차 각도, 등거리변환(isometry)과 같은 매개변수를 적용하여 주기적인 기하학 패턴을 접는다. ‘V 플리즈’는 삼각 격자구조 상의 아코디언 패턴으로 가장 간결하고 대중적인 오리가미 테셀레이션이다. <Figure 10>처럼 사각 격자 테셀레이션을 입체로 구현할 경우는 다각형 모듈의 간격을 벌리고 나서 모듈 비틀기(twist)에 필요한 칼 주름(knife pleats)을 꼭짓점마다 설계해야 한다. 이렇게 최소 단위인 다각형의 모든 꼭짓점에 칼 주름이 지정된 기본영역(fundamental region)은 패턴 구성 시에 평행 이동이 아니라, <Figure 8>과 같이 거울 대칭이나 미끄럼 반사(glide reflection)로 이동해야 한다. 간결한 형식인 아코디언이나 V 플리즈를 제외한다면 3D 오리가미 테셀레이션은 칼 주름에 의한 오버래핑이 발생하고, 기본영역의 중앙에 자리한 다각형이 돌출할 수밖에 없으므로 앞뒤 면에서 서로 다른 기하 패턴이 형성된다. 오리가미 디자이너인 코스멀스키(Kosmulsky, 2022)에 의하면, 이와 같은 비틀어 접기 기법에 따른 기하학적 테셀레이션은 후지모토 슈조(藤本修三, 1922-2015)에 의해 20세기 중반 무렵에 처음으로 시도되어 체계적으로 연구가 수행되었다. 1976년부터 2017년 사이에 그가 창안한 100여 가지의 패턴을 실은 8권의 저서가 출판되었다.

<Table 3> Basic Pleats of Origami Folding (Jackson, P., 2015, pp.34-124)

| 1) Accordion Pleats | 2) Knife Pleats (crease pattern) | 3) Box Pleats | 4) Upright Pleats | 5) Non-parallel Pleats | V Pleats (Miura-ori) |
|---------------------|----------------------------------|---------------|-------------------|------------------------|----------------------|
|                     |                                  |               |                   |                        |                      |

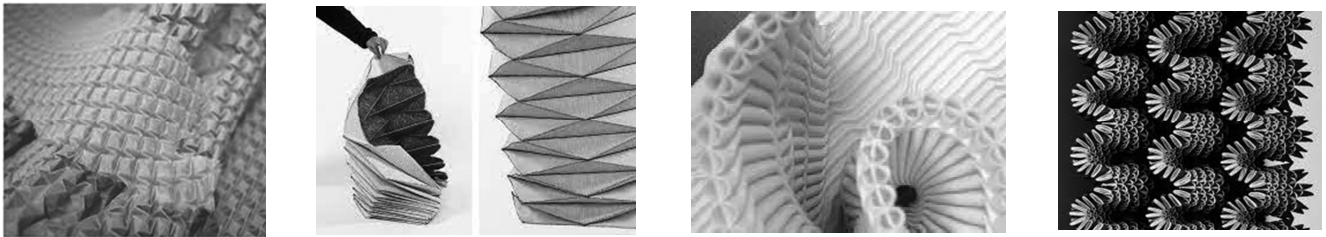


<Figure 9> Ron Resch, Basic Triangle Fold, 1967

취미 공예의 차원에 머물던 종이접기가 20세기 중반 무렵에 디자인계의 주목을 받게 된 계기는 론 레쉬(Ron Resch, 1939-2009)에 의해 ‘모자이크 접기 패턴(folded mosaic pattern)’이라 명명된 일련의 연구 성과에서 비롯되었다. 미국 유타대학교 컴퓨터공학과에 재직 중이던 그는 1971년에 컴퓨터 프로그램을 개발하여 복잡한 3차원 기하 패턴구조물의 프로토타입을 시각화할 수 있는 혁신적인 길을 열었다(Schmidt & Statmann, 2009, p.136). 정밀한 수학적 계산과 알고리즘을 적용해야 하는 템플레이트(template)의 설계가 컴퓨터 프로그램으로 가능해지면서 3D 오리가미 테셀레이션의 종류뿐 아니라 적용 분야가 다양해지는 데 기폭제가 되었다. 현재 대표적인 컴퓨터 프로그램은 예르데(Eric Gjerde)와 베이트먼(Alex Bateman)이 2005년에 공동개발한 ‘TESS’, 로버트 랭(Robert J. Lang)이 2011년에 개발한 ‘Interactive Rings Tessellation’, 2021년에 일본 쓰쿠바대학교 컴퓨터공학과 스코어(SCORE)팀이 공동개발한 ‘EOS(E-Origami System)’ 등이 있다.

<Figure 8>과 같은 트위스트 폴드(twist fold) 패턴은 표면에 곡면(curvature surface)이 형성되고 펼침과 접힘이 자유로워서 키네마틱 속성(kinematic property)을 보이게 되므로 메타소재(metamaterial)로서의 활용도가 매우 높다. 유동성은 벨리 폴드가 경첩(hinge)과 같은 구

실을 하면서 생성된다. 하나의 패턴이라도 접힘과 펼침의 좌표를 자유롭게 표면에 적용함으로써 매번 달라지는 형상과 크기의 곡면을 만들 수 있다. 설치 전이나 철수 후에 접어서 이동하거나 보관할 수 있는 편리성이 장점으로 꼽힌다. 입체적으로 접어서 만든 테셀레이션에는 서로 다른 각도와 기울기가 표면적에 고르게 분포되어 있으므로 건축물 내부에 내장재로 설치할 경우 내부에서 발생하는 소리를 공간 전체에 일정하게 분산시킴으로써 방음효과에 탁월한 특징이 있다.

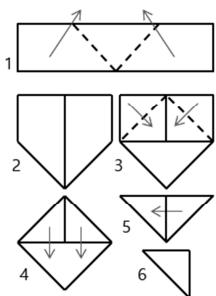


<Figure 10> Atelier Gerard Lognon <Figure 11a-11b> Studio Samira Boon, Archifolds Y series, digital woven fabric, 2018 <Figure 12> Juliette Berthonneau, Bouncing Patterns, 3D pleated textiles, 2017 <Figure 13> Jessica Preston, 2006

3D 오리가미 테셀레이션을 텍스타일 디자인에 적용할 수 있는 가장 대표적인 프로세스는 시보리(shibori) 주름 가공이다. 프랑스의 아틀리에 제라드 로그논(Atelier Gerard Lognon)에서는 가업을 전수한 할아버지로부터 물려받은 3000여 가지의 크래프트지 몰드(mould)를 활용하여 의류용 플리즈 원단을 제작한다. 몰드의 크기는 폭 140cm, 길이 150-350cm 내외이다. 제작 공정은 두 겹의 몰드 사이에 천을 삽입하여 접은 후 금속 실린더에 감아 고정하고 나서 보호용 크래프트지 덮개를 씌운다. 그다음 가스 스티밍에서 쉬폰(chiffon)은 85°C에서 20분, 울 소재는 95°C에서 50분, 폴리에스터는 105°C에서 50분 열가공 과정을 거친다. 열처리 후에 보호용 덮개를 벗긴 채 24시간 식히고 나서 몰드로부터 천을 분리한다(Trebbi, 2008, p.68). <Figure 10>은 사각 격자구조의 입체 패턴이며 <Figure 8>의 템플레이트에 기초한 트위스트 폴드 패턴이다.

오리가미 테셀레이션을 텍스타일 디자인에 적용할 수 있는 또 하나의 주목할만한 프로세스는 자카드 직기(jacquard loom)에 의한 직조다. 자카드 직조에 의한 메타소재의 개발 움직임은 디지털 기술이 혁신적으로 발전하면서 최근 들어 두드러지게 나타나는 현상 중 하나다. <Figure 11>의 알고리즘은 디지털로 설계한 패턴에서 기하학적 선분과 내접한 면마다 조직과 두께를 서로 다르게 직조함으로써 입체 주름 효과를 얻는 방식에 기초한다. 반면, <Figure 12>는 3중직에서 겹의 길이를 달리하여 직조함으로써 입체 직물이 중공(中空)을 내포하면서 주름 효과가 발현되는 방식이다. 두 예시 모두 야코디언 주름의 응용 패턴을 따르고 있다. 이와 같은 3D 텍스타일 패턴은 보강재나 충전재를 사용하지 않고도 빛, 열, 소리 또는 충격을 걸러내는 다양한 절연 특성(insulation property)을 갖는다. 따라서 벽지 대용이나 바닥 깔개 또는 가벽(spacer)과 같은 건축적인 규모의 내장재에서 쓰임새가 넓다.

모듈 조합의 예시인 <Figure 13>은 고대 중국으로부터 유래한 골든 벤처 폴딩(golden venture folding)으로 만든 모듈을 끼워 넣기(tucking) 방식으로 쌓아 올리면서 입체 패턴을 조성한 것이다. 다수의 모듈을 끼워 넣어가며 연결하는 데 최적화된 접기 유형이므로 구조물이 물리적으로 안정적인 상태를 유지하게 된다. 끼워 넣기는 <Figure 14>의 6단계에 도달한 삼각형에 자리한 겹주머니 사이로 두 번째 모듈의 양 날개(60° 각도의 꼭짓점 부위)를 삽입하는 방식이다. 여러 개를 줄줄이 이으면 두툼한 띠 형상이 만들어진다. 양 날개를 벌려 두 개의 모듈 주머니에 삽입하는 방식으로 벽돌쌓기처럼 쌓아나가면 입체형상 구축이 가능하다.

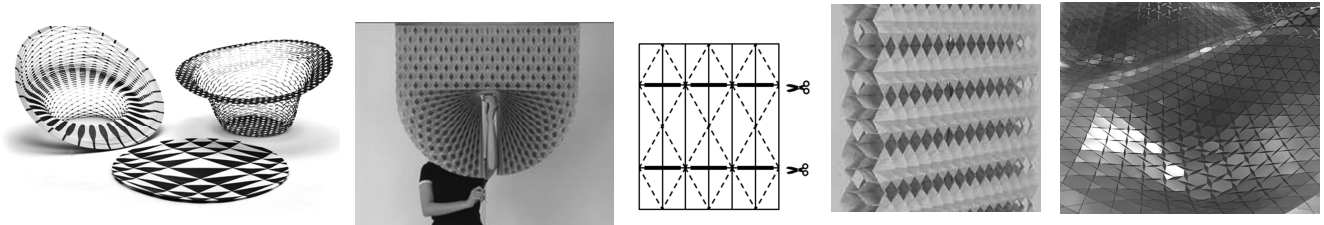


<Figure 14> Golden Venture Folding

### 3.4. 틈새에 기초한 메타소재, 키리가미 테셀레이션

일본어 ‘키루(きる, 자르기)’와 ‘가미(がみ, 종이)’의 합성어인 키리가미(kirigami)는 종이를 절개하여 평면 또는 입체 형태를 만드는 기법을 지칭하는 용어이다. 조밀한 패턴으로 절개된

표면은 액체의 움직임과 같은 유연성(flexibility)뿐 아니라 틈새의 벌어짐에 따른 확장성(expandability)이 매우 우수하다. 오리가미 테셀레이션과 함께 키리가미 테셀레이션의 특질은 물체의 작동 조건에 따라 형태 변경이 가능한 모핑 구조(morphing structure)를 연구하는 공학 분야에서 기계식 메타소재(mechanical metamaterial)를 고안하기 위한 수단으로 쓰인다. 기계식 메타소재는 유클리드 기하학, 위상기하학, 다중물리학에 기반하여 사용 목적에 맞게 형태 및 크기 변경이 가능하도록 첨단 기술이 산출한 신소재 유형을 일컫는 용어다(Neville, 2016). 그 기반으로 대표적인 것은 유클리드 기하학의 테셀레이션, 위상기하학의 극소곡면, 다중물리학의 플로킹 패턴(flocking pattern)이다.



〈Figure 15〉 Torafu Architects, Air Vase, 2009 〈Figure 16a-16c〉 Natchar Sawatdichai, paper blind, 2018 〈Figure 17〉 Lalvani Studio, EROS, stainless steel, 2008

<Figure 15>는 원 중심으로부터 멀어지면서 일정한 간격의 슬릿(slit)이 회전하는 원형 구도인데, 평행사변형 격자(parallelogram lattice)에서 평행을 이루는 선분이 마치 벽돌쌓기처럼 열 마다 서로 엇갈린다. 이와 같은 슬릿의 정렬은 팽창과 수축에 뛰어난 탄성을 고려하며 메타소재를 디자인할 때 참고할 수 있는 키리가미의 표준적인 절개 패턴이다. 원둘레에서 잡아당기는 힘이 가해지면 슬릿에 수직으로 인장 강도가 전달되면서 다이아몬드형 틈새가 발생한다. 인장 강도에 따라 그릇 형상부터 병 형상에 이르기까지 다양한 형태를 만들 수 있으며 미사용 시에는 틈새를 없애으로써 다시 평면으로 되돌릴 수 있다. 이러한 슬릿이 <Table 2>의 상자 주름(box pleats)과 결합할 경우는 개방형 벌집 구조가 생성된다.

<Figure 16>은 <Table 2>의 1) 번과 3) 번이 결합한 테셀레이션이며, 거울 이미지로 내접하는 삼각형의 선분을 절개한 디자인이다. 아코디언 주름에서 경첩 구실을 하는 벨리(valley) 접기 대신에 슬릿이 열리면서 형태 변경이 발생하는 원리이다. 디지털 입력값대로 종이 표면 위에 주름골과 절개를 삽입한 후에 수작업으로 패턴을 접고 중공을 내포하도록 3접으로 붙여 만든 블라인드이다. 3접 중에서 양쪽 바깥면은 슬릿이 포함된 패턴이다. 그 내부에 좌우로 나란히 삽입한 두 장의 아코디언이 내접하도록 한쪽 주름골은 앞면의 마운틴 폴드에, 반대 면은 벨리 폴드에 부착한 것이다. 이와 같은 다층 구조는 블라인드의 높낮이를 조정하는 끈을 내부중앙에 감출 뿐 아니라 앞뒷면이 일정한 간격을 두고 동시에 열리거나 닫히도록 구조물을 지탱하는 구실을 한다.

목재나 금속과 같이 단단한 재료도 틈새를 이용하여 물성을 변형시킴으로써 비정형 곡면이 가지는 부드러운 곡률을 생성할 수 있다. 절개 공정은 보통 워터젯(water-jet) 절단기를 활용한다. <Figure 17>에서처럼 균일한 폭의 선직면(ruled surface)으로 절개된 표면이 특정 좌표로부터 밀리거나 당겨질 때, 허용 가능한 표면 왜곡이 일어나면서 유연한 물결구조와 같이 곡면으로 변한다. 여기에는 분절된 절개선의 길이와 방향 및 모듈을 밀거나 당기는 힘의 크기와 방향이 매개변수로 작용한다. 변위의 힘이 특정 좌표에 가해짐에 따라 인접한 모듈을 끌어당기거나 밀어냄으로써 전체 시스템의 형상이 변화하는 데 일조하게 된다. 위상기하학(topology)의 좌표 수치에 기초하여 극소곡면상의 제분(subdivision) 방식을 활용한다면 곡면의 팽창 특성을 극대화할 수 있다.

#### 4. 결론 및 제언

본문에서 살펴본 바와 같이 3D 파라메트릭 텍스타일 디자인은 모듈의 형태 및 개체화 여부에 따라 크게 네 가지 유형으로 분류할 수 있다. 선형 구조와 세포 증식형 디자인은 모듈의 해체와



제조립에 특화된 방법론이고, 오리가미와 키리가미 테셀레이션은 곡률 변화에 따른 형태 변경이 탁월한 방법론이다. 선형 구조는 중력작용에 순응하는 방법론인 수직선의 수평 병렬이 주류이며 슬라이스폼이나 인터레이싱 기법을 추가하여 그물망 구조를 형성하기도 한다. 세포 증식형은 본 논문에 속하는 선행연구에서 정량적으로 가장 비율이 높은 방법론이다. 부분과 전체의 조화로운 관계를 형성하는 규칙인 일련의 알고리즘 체계에 의해 표면적의 증식이 자유롭게 확보되는 특징이 있다. 이 방식은 최소 단위인 모듈의 주기적인 정렬로 패턴을 형성하므로 구조적 차원에서 반복성과 연속성이 명확하게 작용한다. 또한, 모듈의 재배열에 의한 가변성이 우수하여 사용자 맞춤형 공간 연출에 적합한 특성을 갖는다. 생활공간에서 이 두 가지 유형으로 만든 3D 텍스타일은 보강재나 충전재를 사용하지 않고도 빛, 열, 소리 또는 충격을 걸러내는 절연 기능을 충족시킨다.

평면 테셀레이션의 모듈을 개체로 독립시키지 않고 경계선을 접거나 칼집을 내어 입체 패턴을 형성하는 유형은 해체와 제조립이 불가능하지만, 표면 곡률을 자유자재로 변형할 수 있고 접고 펼치는 기능에 따라 체적 변화가 뛰어난 특징이 있다. 입체 곡면으로의 전환은 트위스트 폴드의 역학에서 비롯된다. 그러한 물성 변화에 기초한 메타소재의 개발을 위해 첨단 공학 분야에서 오리가미와 키리가미의 연구가 활발히 진행 중이다. 그 여파로 공간디자인 분야에서도 고전적인 종이접기와 테셀레이션이 접목된 3D 텍스타일 디자인을 최근 들어 다시 주목하고 있다. 초경량의 소재는 열가소성 섬유의 주름 가공이 주류이고 그밖에는 타이벡(Tyvek)처럼 대체종이의 물성을 지닌 재료가 주로 쓰인다.

알고리즘과 모듈 기반의 3D 텍스타일 디자인의 기획 단계에서 유의할 점은 다음과 같다. 첫째, 모듈 형태와 조합방식의 표준을 설계함으로써 제조공법의 단순화를 추구해야 한다. 사용자 지향 디자인인 다품종 소량 생산의 문제점은 제작 공정상의 복잡성 비용이다. 비용 절감을 위한 세분화 전략을 통해 단일 구성의 표준화된 모듈로도 다양한 결과물을 산출할 수 있도록 알고리즘의 최적화를 모색해야 한다. 둘째, 모듈 조합 패턴의 알고리즘에는 고정성과 변동성이 개입해야 한다. 고정성은 디자이너의 전략적 의도를 견지하는 불변의 법칙이고, 그것을 바탕으로 다양성을 파생시키는 매개변수가 변동성이다. 단일한 모듈을 기반으로 하는 디자인에서 변동성은 모듈 개체의 수에 따른 표면적 규모의 변화, 모듈 병렬에서 국지적인 생략에 따른 시각적 리듬감의 변화, 테두리의 양태 변화 등과 같은 구성요소 간의 함수관계에서 발생할 수 있다. 또한, 두 가지 이상의 모듈 개체를 기반으로 하는 디자인에서 모듈 병렬의 주기적 또는 비주기적 리듬에 따른 패턴 변화를 추가할 수 있다. 두 가지 종수 이상의 모듈을 조합하는 경우는 이중 모듈 간의 구조적 호환성을 반드시 확보해야 한다. 그렇지 못하면 모듈의 조립이 물리적으로 불가능하다. 셋째, 모듈 조합은 표준화된 프로세스에 따라 패턴의 해체와 재조합이 반복적으로 실행될 수 있는 우수한 내구성뿐 아니라 울이 풀리지 않는 절단면과 같은 필수조건이 충족되는 재료를 활용해야 한다. 특히, 표면적의 규모가 수직 방향으로 드넓게 배치될 때 작품의 하중에 의해 상단의 연결 장치가 풀리지 않도록 재료 선택의 매개변수를 세심하게 설계하는 것이 중요하다.

최근의 패러다임인 대량 맞춤 생산 추세는 입체적인 섬유 구조물의 수명주기 동안 정확성, 일관성, 유효성이 보전될 수 있도록 구조적인 무결성, 이동성, 가변성, 다기능성의 방법론을 추구하는 변화를 추동하고 있다. 그와 같은 변화를 지향하는 선행연구의 방법론과 기하학이 제공하는 추상적 계시를 토대로 저마다의 디자인 방법론을 연구하는 데 도움이 될 기초자료로 쓰이길 기대한다.

## References

- Gamwell, L. (2019). *Mathematics and art*. (Kim S. H. Trans.). Sam & Parkers. (Original work published in 2016)

- Holmen, M. (2012). The art of disappearing without being gone, *Soft Magasin*.  
<https://www.norsketekstilkunstnere.no/wp-content/uploads/2018/11/softmagasin-2012.pdf>  
 (accessed 2022. Dec. 13)
- Jabi, W. (2013). *Parametric design for architecture*. Laurence King Pub.
- Jackson, P. (2015). *Complete pleats: Pleating techniques for fashion, architecture and design*. Laurence King Pub.
- Kosmulsky, M. (2022). Shuzo Fujimoto – First origami engineer?. *The Fold, issue 72*.  
<https://origamiusa.org/thefold/article/shuzo-fujimoto-first-origami-engineer> (accessed 2023. Jan 3)
- Menges, A. & Sean A. (Ed.). (2011). *Computational design thinking*. John Wiley & Sons Ltd.
- Neville, Robin M., Fabrizio Scarpa & Alberto Pirrera. (2016). Shape morphing Kirigami mechanical metamaterials. *Scientific Report, 6*(31067).  
[https://www.nature.com/articles/srep31067?WT.feed\\_name=subjects\\_composites](https://www.nature.com/articles/srep31067?WT.feed_name=subjects_composites) (accessed 2022. Dec. 13)
- Schmidt, P. & Stattmann, N. (2009). *Unfolded: Paper in design, art, architecture and design*. Birkhauser.
- Trebbs, J. (2008). *The art of folding: Creative forms in design and architecture*. Promopress.
- Turner, J. (2018). Aurelie Tu: Crafting a positive outlook. *Impactmania*.  
<https://www.impactmania.com/article/aurelie-tu-crafting-positive-outlook/> (accessed 2023 Jan. 10)

## List of Figures

- <Figure 1> <http://www.maybentearonsen.no/> (accessed 2022. Dec 13)
- <Figure 2> <http://qvilt.nl/> (accessed 2022. Dec 14)
- <Figure 3> <https://www.annekyroquinn.com/> (accessed 2022. Dec 14)
- <Figure 4> <https://www.contemporist.com/the-vessel-collection-from-craftedsystems/> (accessed 2022. Dec 14)
- <Figure 5> <https://www.archdaily.com/778523/> (accessed 2022. Dec 14)
- <Figure 6> <https://www.illustration.com/> (accessed 2022. Dec 14)
- <Figure 9> <http://www.ronresch.org/ronresch/> (accessed 2023. Feb 13)
- <Figure 10> <https://www.flickr.com/photos/clementguillaume/6459147785> (accessed 2022. Dec 13)
- <Figure 11> <https://samiraboon.com/> (accessed 2023. Jan 18)
- <Figure 12> <https://designwanted.com/bouncing-patterns-by-juliette-berthonneau/> (accessed 2023. Jan 23)
- <Figure 13> <https://www.pinterest.co.kr/pin/33143747232616057/> (accessed 2023. Feb 2)
- <Figure 15> <https://japansdesign.nl/product/5972/> (accessed 2023. Feb 2)
- <Figure 16> <https://www.designboom.com/design/natchar-sawatdichai-paper-blinds-09-19-2018/> (accessed 2023. Jan 18)
- <Figure 17> <https://www.pinterest.co.kr/pin/304415256038311549/> (accessed 2023. Jan 18)