

석사학위논문

광원을 이용한  
컴퓨터이셔널 형상 제작 연구

2026년

한 성 대 학 교 대 학 원

미 디 어 디 자 인 학 과

시각커뮤니케이션디자인전공

김 수 한



석사학위논문  
지도교수 전신중

광원을 이용한  
컴퓨터이셔널 형상 제작 연구

A Study on Computational Shape Making  
Using Light Source

2025년 12월 일

한성대학교 대학원

미디어디자인학과

시각커뮤니케이션디자인전공

김수한

석사학위논문  
지도교수 전신중

광원을 이용한  
컴퓨터이셔널 형상 제작 연구

A Study on Computational Shape Making  
Using Light Source

위 논문을 미술학 석사학위 논문으로 제출함

2025년 12월 일

한성대학교 대학원

미디어디자인학과

시각커뮤니케이션디자인전공

김 수 한

김수한의 미술학 석사학위 논문을 인준함

2025년 12월 일

심사위원장 김지현 (인)

심사위원 전신종 (인)

심사위원 장경국 (인)

# 국 문 초 록

## 광원을 이용한 컴퓨터이셔널 형상 제작 연구

한 성 대 학 교 대 학 원  
미 디 어 디 자 인 학 과  
시각커뮤니케이션디자인전공  
김 수 한

본 연구는 빛의 투영 메커니즘을 활용하여 목표 형상을 생성하는 과정을 자동화하고, 실제 조명 환경에서 발생하는 형상 왜곡을 정량적으로 보정할 수 있는 시스템을 구축하는 데에 목적이 있다. 연구자의 기존 투영 기반 조형 연구는 점광원의 이상적 조건을 전제로 한 비례 계산식으로 형상 제작에 발생하는 반복 실험을 줄이는 방법을 제안하였으나, 수기계산을 이용하여야 하므로 범용성이 떨어지는 단점이 존재했다. 또한, 실제 면광원에서 필연적으로 발생하는 반그림자, 확산, 광원 면적에 따른 경계 흐림과 같은 물리적 변수들을 체계적으로 반영하기 어렵게 하며, 결과적으로 디지털 시뮬레이션과 물리 환경 간의 구조적 차이를 유발하는 한계를 지닌다. 특히 형상의 정확성 확보를 위해 개별 지점의 오차를 반복적으로 측정하고 보정하는 기존 방식은 재현성과 효율성 측면에서도 제약이 있었다.

이에 본 연구는 라이노(Rhinoceros)와 그래스호퍼(Grasshopper)를 활용한 디지털 시뮬레이션 환경에서, 선행연구에서 구축된 실험 구조를 알고리즘 절

차로 전환하는 컴퓨터이셔널 설계 프로세스를 정립하였다. 먼저 목표 형상의 외곽 정보를 분석하여 1차 타공 패턴을 역산출하는 알고리즘을 설계하고, 이를 디지털 시뮬레이션 환경에서 자동으로 생성할 수 있는 시스템을 구현하였다. 더불어 실제 면광원의 물리적 특성에 의해 발생하는 형상 변위 문제를 해결하기 위해, 투영된 형상의 상·하·좌·우 네 개의 극점을 기준으로 한 변위 분석 절차를 마련하였다. 분석된 변위값은 단일 보정량으로 통합되며, 보정 알고리즘은 형상 전체 비례의 일관성과 국부 경계의 선명도를 동시에 확보할 수 있도록 구성되었다. 이러한 과정은 목적함수 기반의 반복적 산출 구조를 통해 디지털 시뮬레이션 환경과 물리 환경 간 형상 차이를 최소화하는 방향으로 최적화되었다.

구축된 자동화 시스템은 디지털 시뮬레이션 단계에서 생성된 타공 패턴과 이에 대응하는 실제 투영 실험 결과를 비교 분석함으로써 검증되었다. 그 결과, 면광원에서 발생하는 물리적 오차는 단일 오프셋(offset) 기반의 보정 알고리즘을 적용함으로써 효과적으로 완화되었으며, 목표 형상의 시각적 재현도가 유의미하게 향상됨을 확인하였다. 이는 단순히 형상의 외곽만을 보정하는 수준을 넘어, 디지털-물리 환경 간의 구조적 차이를 시스템적으로 해석하고 이를 알고리즘적으로 통합하려는 본 연구의 의도가 실질적으로 구현되었음을 의미한다.

본 연구에서 제안하는 통합 알고리즘 및 자동화 시스템은 빛의 물리적 특성을 활용한 조형 표현이 실험적 성격을 넘어 제작 환경 전반으로 확장될 수 있는 기반을 제공한다. 이러한 확장성은 향후 라이트 아트, 공공조명, 건축 외피 디자인, 미디어 파사드, 인터랙티브 공간 연출 등 빛 기반 조형 설계 전반에서 적용 가능한 새로운 설계 인프라로 기능할 수 있을 것으로 기대된다. 더 나아가 디지털 알고리즘을 통해 조형적 의도를 정량화하고, 물리 환경에서의 불확실성을 체계적으로 관리할 수 있다는 점에서 디자인 프로세스의 표준화와 자동화를 향한 중요한 시도로 평가될 수 있을 것으로 판단된다.

**【주요어】** 광원 투영, 컴퓨터이셔널 디자인, 디지털 시뮬레이션, 자동화 시스템, 매개변수

# 목 차

I. 서 론 .....	1
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 목적 .....	2
1.3 연구 방법 및 범위 .....	2
II. 이론적 배경 및 선행연구 .....	4
2.1 빛을 활용한 조형 예술 .....	4
2.1.1 빛의 조형적 인식 변화 .....	4
2.1.2 빛의 조형적 표현 .....	6
2.1.2.1 예술적 매체 .....	7
2.1.2.2 디지털과 미디어 융합 .....	11
2.1.2.3 환경과 공공적 활용 .....	14
2.2 빛을 활용한 형태 생성의 메커니즘 .....	17
2.2.1 빛의 투영과 시각적 인지의 관계 .....	17
2.2.2 빛의 투영 형상과 광원의 상호작용 .....	18
2.3 Computational Design과 Zero-code 기반 자동화 설계 .....	20
2.3.1 Computational Design .....	20
2.3.2 Algorithmic Thinking와 매개변수 설계 .....	23
2.3.3 Zero-code 기반 설계 환경의 주요 프로그램 .....	25
2.3.3.1 Autodesk Dynamo .....	25
2.3.3.2 Houdini FX .....	26
2.3.3.3 TouchDesigner .....	27
2.3.3.4 Rhinocreos, Grasshopper, Kangaroo .....	28
III. 실험 도구 구성 및 연구 설계 .....	30
3.1 시스템 구현을 위한 도구 구성 .....	30
3.1.1 Rhinoceros 및 Grasshopper의 적용 가능성 .....	30
3.1.1.1 Rhinoceros의 역할 및 특징 .....	30
3.1.1.2 Grasshopper의 역할 및 특징 .....	31
3.1.1.3 결합을 통한 연구 적용 가능성 .....	31

3.1.2 Rhinoceros와 Grasshopper의 데이터 처리 구조 .....	33
3.2 실험 시스템 설계를 위한 개념과 방법 .....	34
3.2.1 실험 시스템의 구성 개념 .....	34
3.2.2 실험 시스템의 구축 방법 .....	35
3.2.2.1 선행 실험의 디지털 재현 .....	36
3.2.2.2 역설계 시스템 구성 .....	40
3.2.3 시스템 성능 검증 및 결과 분석 .....	44
<b>IV. 자동화 시스템 알고리즘 구현 .....</b>	<b>46</b>
4.1 자동화 시스템 알고리즘 설계 .....	46
4.1.1 통합 알고리즘 구조 .....	46
4.1.2 통합 알고리즘 매개변수 설정 .....	48
4.2 자동화 시스템 구현 .....	50
4.2.1 통합 알고리즘 디지털 구성 .....	50
4.2.2 통합 알고리즘 보정 및 검증 실험 .....	55
4.2.3 통합 알고리즘 결과 종합 .....	63
<b>V. 결론 .....</b>	<b>64</b>
<b>참 고 문 헌 .....</b>	<b>67</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>72</b>

## 표 목 차

[표 3-1] Details of the Light Source Projection Algorithm .....	37
[표 3-2] Details of Reverse Design Algorithm for Extracting Perforated Panels .....	41
[표 4-1] Details of the Light Source Projection and Shape Correction Algorithm .....	51
[표 4-2] Physical Experimental Conditions .....	60
[표 4-3] Physical Experiment Results .....	62

## 그림 목 차

[그림 2-1] Changes in the Formative Perception of Light with the Times .....	6
[그림 2-2] Dirty White Trash (With Gulls), 1998 .....	8
[그림 2-3] Miss Understood & MR Meanor, 1997 .....	8
[그림 2-4] Intersections, 2013 .....	9
[그림 2-5] A Beautiful Despair, 2021 .....	9
[그림 2-6] Shadow Trick, 2008 .....	10
[그림 2-7] Shadow Trick, 2001 .....	10
[그림 2-8] Universe of Water Particles on a Rock where People Gather .....	11
[그림 2-9] The Infinite Crystal Universe .....	11
[그림 2-10] Machine Hallucination .....	12
[그림 2-11] Machine Hallucination : NYC .....	12
[그림 2-12] Machine Hallucinations — Sphere .....	12
[그림 2-13] Watherlicht .....	13
[그림 2-14] Van Gogh Path .....	13
[그림 2-15] 안동시 범흥지하차도 빛터널 .....	15
[그림 2-16] 일본 미야기현 푸른 가로등 .....	15
[그림 2-17] 서울스퀘어 미디어파사드 .....	16
[그림 2-18] Vivid Sydney .....	16
[그림 2-19] 진주시 남강 유등축제 .....	17
[그림 2-20] Lyon Festival of Lights .....	17
[그림 2-21] Light Projection and Light Source Interaction .....	19
[그림 2-22] Experimental Results of Light Source Projection Shape Manufacturing, 2024 .....	20
[그림 2-23] Light Projection and Light Source Interaction .....	21
[그림 2-24] Computational Design Thinking Hierarchy Chart .....	23
[그림 2-25] Autodesk Dynamo BIM Usage Environments .....	26

[그림 2-26] Houdini FX Usage Environments .....	27
[그림 2-27] TouchDesigner Usage Environments .....	28
[그림 2-28] Rhinoceros and Grasshopper with Kangaroo Usage Environments .....	29
[그림 3-1] Data Processing Structure for Rhino and Grasshopper .....	34
[그림 3-2] Light Source Projection Shape Experiment Device, 2024 .....	36
[그림 3-3] Light Source Projection Algorithm .....	37
[그림 3-4] Digital Simulation of the Light Source Projection Algorithm .....	40
[그림 3-5] Reverse Design Algorithm for Perforated Panel Extraction .....	41
[그림 3-6] Digital Simulation of Reverse Design Algorithm for Perforated Panel Extraction .....	44
[그림 3-7] The shape of the extracted perforated panel .....	44
[그림 3-8] Target Shape Reproduction Experiment Based on Light Source Projection Algorithm .....	45
[그림 4-1] Flowchart of Light Source Projection and Shape Correction Algorithms .....	47
[그림 4-2] Schematic Representation of A Physical Experiment .....	47
[그림 4-3] Integrated Algorithm Parameters .....	50
[그림 4-4] Light Source Projection and Shape Correction Algorithms ..	50
[그림 4-5] Defining Pole-specific Error Values .....	55
[그림 4-6] Projection Surface .....	56
[그림 5-1] Utilization of CPTED Aspects .....	65
[그림 5-2] Utilization of Signage Aspects .....	66
[그림 5-3] Utilize Product Design Aspects .....	66

# I. 서론

## 1.1 연구 배경

조형 표현에서 빛은 단순한 조명 기능을 넘어 형태를 드러내고 공간의 분위기를 결정하며, 시각적 의미를 구성할 수 있는 중요한 잠재력을 지닌 매체이다. 이러한 가능성에 주목한 본 연구자는 빛의 조형적 표현에 관한 지속적인 연구를 진행해 왔다. 선행연구에서는 빛이 물리적 구조와 결합할 때 발생하는 다양한 시각적 형상 생성 원리를 실험적·정량적으로 분석하고, 타공 패널을 통과한 빛이 특정 형상을 투영하는 메커니즘을 규명하는데 집중하였으며, 특히 점광원을 기반으로 비례 계산식을 정립하고, 투영 구조를 분석하여 목표 형상을 생성하는 기초적 연구를 수행하였다. 이러한 일련의 과정은 빛을 활용하여 시각적 결과를 만들어낼 수 있다는 조형적 가능성을 실험적으로 입증한 단계였다.

그러나 선행연구는 이상적 조건인 점광원을 중심으로 구축되었기 때문에, 물리 환경에서 필연적으로 발생하는 물리적 요인을 충분히 반영하지 못했다는 한계를 지닌다. 또한, 목표 형상을 구현하기 위해 조건 변화에 따라 수기 계산과 반복 실험을 수행해야 하는 등, 형상 생성 과정의 효율성과 재현성에 제약이 존재하였다.

이러한 문제의식 속에서 본 연구는 기존의 한계를 보완하고, 연구자의 선행연구를 고도화하기 위한 확장 연구로서 출발하였다. 특히 빛의 투영 메커니즘을 디지털 시뮬레이션 환경에서 정량적으로 분석·시각화하고, 실제 면광원의 물리적 특성에 따라 발생하는 형상 오차를 보정할 수 있는 디지털-물리 통합 자동화 시스템 알고리즘을 설계하고자 한다. 이는 빛의 조형적 가능성을 보다 안정적이고 정밀하게 다루기 위한 시도이자, 물리 실험에서 벗어나 연산 기반의 조형 설계 패러다임으로 전환하려는 필요성을 반영한다.

## 1.2 연구 목적

본 연구의 목적은 빛의 투영 메커니즘을 기반으로 목표 형상을 자동으로 생성할 수 있는 컴퓨터이셔널 설계 체계를 구축하고, 물리 환경에서 발생하는 형상 오차를 정량적으로 분석·보정할 수 있는 디지털-물리 통합 알고리즘을 마련하는 데에 있다. 이를 위해 선행연구에서 점광원을 기준으로 수기 계산과 반복 실험을 통해 정립했던 비례 계산식을 디지털 연산 구조로 재구성하고, 목표 형상으로부터 타공 패턴을 역으로 도출하는 알고리즘을 설계하여 형상 생성 과정을 자동화하고자 한다.

나아가 실제 면광원의 크기와 확산, 반그림자 형성 등으로 인해 나타나는 투영 형상의 변위를 계측하여 정량적 데이터로 축적하고, 이를 기반으로 통합 보정 알고리즘을 도출함으로써 목표 형상의 재현도를 향상하고자 한다. 더불어, 본 연구의 결과가 이론적 시뮬레이션에 그치지 않고, 실제 설치 환경의 조건과 제약을 고려한 설계 프로세스로 기능할 수 있도록 현실적 변수와의 연동성을 함께 확보하고자 한다.

이러한 과정을 라이노와 그래스호퍼로 구성된 컴퓨터이셔널 설계 환경 안에서 일관되게 수행함으로써, 선행연구에서 한계로 지적되던 반복 실험과 수기 계산 중심의 비효율성을 줄이고, 형상 생성 과정을 재현 가능한 자동화 설계 프로세스로 전환하는 것을 궁극적인 목표로 삼는다. 더불어, 이와 같은 시스템을 라이트 아트, 공공조명, 미디어 파사드 등 실제 공간 기반의 조형 설계에 적용할 수 있는 기초를 제시함으로써, 빛을 활용한 시각적 표현 연구의 범위를 실험적 차원에서 실질적 설계 인프라로 확장하고자 한다.

## 1.3 연구 방법 및 범위

본 연구는 디지털 시뮬레이션 환경의 연산 구조와 실제 투영 실험을 통합적으로 다루는 방식으로 진행되었다. 먼저 빛을 활용한 조형 예술, 투영 메커니즘, 컴퓨터이셔널 설계 및 제로코드·노코드 기반 설계 환경에 대한 이론적

배경과 선행연구를 검토하여 연구의 개념적 틀을 정리하였다. 이후 라이노와 그래스호퍼를 중심으로 목표 형상을 입력하면 이를 투영 구조에 적합한 타공 패턴으로 자동 변환하는 통합 알고리즘 구조를 설계하고, 형상의 분할 밀도, 패널 해상도, 광선 벡터 산출 방식 등 주요 매개변수를 설정하여 연산 과정을 체계화하였다.

다음으로, 디지털 시뮬레이션 환경에서 구성한 알고리즘을 기반으로 실제 면광원을 사용한 투영 실험을 수행하였다. 동일한 목표 형상과 패널 조건을 디지털과 물리 환경에 각각 적용하여 투영 결과를 비교하고, 광원의 크기와 확산, 반그림자 형성 등으로 인해 발생하는 형상 변위를 상·하·좌·우 네 개의 극점 기준으로 계측하여 정량적 데이터로 축적하였다. 이렇게 도출된 오차값을 분석하여 보정량을 산출하고, 이를 패널 형상에 적용하는 보정 알고리즘을 설계한 뒤, 보정 전·후 결과를 비교함으로써 형상 재현도와 설계 체계의 개선 효과를 검증하였다.

연구 범위는 단일 면광원을 사용하는 정적 투영 환경에서 2차원 목표 형상을 재현하는 경우로 한정하였다. 광원의 색온도나 색 변화, 다중 광원 및 동적 조명 시스템, 투영면 재질 및 실내·실외 환경 변화와 같은 외부 변수는 본 연구의 분석 범위에서 제외하였다. 특히, 면광원의 발광면적이 지나치게 큰 경우 경계 변위(오차)가 비선형적으로 증가하여 정밀한 형상 재현이 어려우므로, 본 연구는 발광면적이 제한된 소형 면광원을 사용한다. 이는 실제 경관조명 및 투사용 조명이 소형 LED 모듈을 기반하는 현실적 적용 범위와도 부합한다. 아울러 실험에 사용된 광원은 실제 현장에서 활용 가능한 밝기와 비용 수준의 제품으로 제한하여, 자동화 알고리즘의 검증이 물리 환경 조건과 유사한 범위 내에서 이루어지도록 하였다. 또한, 관찰자의 시각 평가나 심리적 효과보다는, 투영 형상의 기하학적 변위와 재현도를 중심으로 한 정량적 분석에 초점을 두었다. 이와 같은 방법과 범위 설정을 통해, 본 연구는 광원 투영을 통한 형상 제작 자동화 시스템 개발과 물리 실험을 결합한 실험 연구로서, 제안된 자동화 시스템의 타당성과 적용 가능성을 검증하고자 한다.

## Ⅱ. 이론적 배경 및 선행연구

### 2.1 빛을 활용한 조형 예술

#### 2.1.1 빛의 조형적 인식 변화

본 절에서는 빛이 조형 예술의 근원적 사유로 자리 잡게 된 과정을 인식의 변화 중심에서 고찰하고자 한다. 고대의 신성한 상징으로서의 빛이 철학적·자연학적 탐구를 거쳐 예술의 조형 원리로 확장되는 흐름을 시대적 배경과 사상적 전환을 통해 살펴본다.

고대와 중세의 사상에서 빛은 신의 존재와 초월성을 상징하는 표상으로 이해되었다. 플라톤주의 전통에서는 빛을 근원적 빛(Lux)과 그 발현인 비춤(Lumen)으로 구분하며, 존재의 계열적 질서와 인식의 단계를 설명하는 원리로 삼았다. 이러한 사유는 빛을 단순한 자연 현상이 아닌, 감각과 진리를 매개하는 인식의 근원으로 파악한 것이다.<sup>1)</sup> 중세의 스콜라 철학자 안셀무스(Anselmus)와 보나벤투라(Bonaventura)는 빛의 개념을 인간 인식의 근거로 해석하며, 감각 세계와 정신세계를 분절이 아닌 연속적 구조로 이해하였다.<sup>2)</sup> 이러한 인식은 빛이 형이상학적 사유에서 인식의 구조를 설명하는 원리로 확립되는 전환점이었다.

이후 고대 자연철학자들은 빛을 감각의 매개이자 물리적 현상으로 탐구하기 시작하였다. 엠페도클레스(Empedocles)는 “빛은 눈에서 나오는 불(광학적 불꽃)이며, 시각은 그 불이 사물에 닿는 작용”이라 주장하였고, 플라톤(Plato)은 『티마이오스(Timaeus)』에서 “신이 인간의 눈 속에 순수한 불이 흐르도록 만들었다”라고 서술하였다.<sup>3)</sup> 반면 아리스토텔레스(Aristoteles)는 빛을 불이나

---

1) 김영철. (2019). 인식 원리로서의 빛 -안셀무스와 보나벤투라를 중심으로-. 『동국대학교 동서사상연구소』, 30, pp. 25-32.

2) ibid., pp. 25-32.

3) Bruce Watson. (2008). 『빛』. 경기: 삼천리, pp. 39-41.

원자와 같은 물질이 아니라 투명한 매질의 작용으로 정의하며, 신화적 개념을 물리적 원리로 전환시켰다.<sup>4)</sup> 이러한 변화는 빛이 초월적 상징에서 지각 가능한 자연법칙으로 이동하는 계기가 되었고, 르네상스 이후 예술의 과학적 접근에 사상적 토대를 제공하였다.

르네상스 시기에 들어 빛은 더 이상 신비적 상징이 아니라 시각적 질서와 합리적 공간을 구성하는 원리로 다루어졌다. 알베르티(Leon Battista Alberti)는 그의 저서 『회화에 관하여(Della Pittura)』에서 회화의 구성 요소를 윤곽선, 구성, 빛의 수용으로 제시하며, 빛과 색의 분배를 통한 전체적 균형을 강조하였다. 그는 거울을 이용한 색과 빛의 균형 검증을 제안함으로써, 회화 공간을 기하학적 질서와 비례의 원리 속에서 이론화하였다.<sup>5)</sup> 바로크 시대의 카라바치오(Michelangelo da Caravaggio)는 극적인 명암 대비를 통해 현실성과 신성, 감각과 정신의 이중 구조를 동시에 드러내었고, 렘브란트(Rembrandt)는 빛을 정신적인 것으로 관념화하여 감정과 내면의 표현 수단으로 사용하였다.<sup>6)</sup> 이 시기 빛은 단순한 조명 효과가 아니라 감정과 의미를 전달하는 조형적 언어로 기능하였다.

19세기 인상주의는 빛의 개념을 다시 한번 전환시켰다. 모네(Claude Monet)는 대기의 변화에 따라 달라지는 빛을 관찰하고, 이를 대상과 결합된 감정의 변화로 표현했다. 쇠라(Georges Seurat)는 색의 분해를 통해 빛과 대기의 관계를 시각화하였으며, 세잔(Paul Cézanne)은 빛의 스펙트럼 속 색의 본질적 질서에 대한 개념을 탐구하여 형태·공간의 논리적 구성을 얻을 수 있었다.<sup>7)</sup> 이러한 과학적 접근은 시각 경험의 구조를 탐구하는 근대 예술의 출발점이 되었으며, 빛은 더 이상 외부 세계를 비추는 수단뿐 아니라 지각의 경험을 구성하는 조건으로 확립되었다.

20세기 이후에는 빛이 독립된 조형 재료로 부상하였다. 모홀리나기(László Moholy-Nagy)는 산업 재료와 인공광을 결합한 작품을 통해 빛이 형태를 생

---

4) Bruce Watson, op.cit., pp. 42-43.

5) Leon Battista Alberti. (1998), 『알베르티의 회화론』. 경기: 사계절 pp. 137-138.

6) 김진수, 홍경희. (2010). 빛을 활용한 조형표현에 관한 고찰. 『한국공예논총』, 13(3), pp. 13-15.

7) 박기태, 이진호. (2017). 평면조형에서 빛의 수용과 표현에 관한 연구. 『기초조형학연구』, 18(3), pp. 130-132.

성하고 시간의 흐름에 따라 빛의 형상이 변화하는 과정을 시각화하였다. 라리 오노프(Mikhail Larionov)는 광선주의(Rayonism) 회화에서 빛의 선과 교차를 통해 에너지의 흐름을 추상적으로 표현하며, 빛 자체를 조형의 주체로 제시하였다. 제임스 터렐(James Turrell)과 올라퍼 엘리아슨(Olafur Eliasson)은 관람자의 시각 경험을 작품의 일부로 끌어들이, 빛을 감각·시각·공간이 통합된 현상적 매체로 확장하였다.<sup>8)</sup>

21세기 디지털 시뮬레이션 환경에 이르러 빛은 더 이상 물질적 실체가 아닌 데이터로써의 조형 요소로 변모하였다. 미디어 파사드, 홀로그램, 인터랙티브 설치 등은 빛을 정보화된 이미지로 다루며, 시공간적 경험을 제공하는 새로운 매체로 발전되었다. 이로써 빛은 신성의 상징에서 출발해 철학적 개념, 과학적 원리, 감각의 언어, 그리고 디지털적 생성 시스템으로 진화하며, 예술의 존재 방식과 인식 구조를 끊임없이 확장시켜 왔다. 결국 빛의 조형적 인식 변화는 시대마다 그 의미와 역할을 달리하며, 존재와 인식의 관계를 규정짓는 매개로 작동해 왔다. 이러한 흐름은 예술이 감각의 경험과 인식의 구조를 새롭게 규정짓는 과정 속에서 빛을 조형의 근원적 원리로 재정립해 온 결과라 볼 수 있다.



[그림 2-1] Changes in the Formative Perception of Light with the Times

### 2.1.2 빛의 조형적 표현

빛이 인식의 원리에서 조형 표현의 한 요소로써 자리 잡는 과정을 살펴본 데 이어, 본 절에서는 그러한 사유가 현대 시각예술과 디자인 영역에서 어떻게

8) 박기태, 이진호. op.cit., pp. 25-32.

게 구체적 표현으로 확장되었는지를 살펴본다.

빛은 더 이상 형상을 비추거나 공간을 드러내는 단일 재료에 머물지 않고, 매체와 기술, 환경, 감성의 영역을 넘나들며 복합적인 조형 언어로 발전하고 있다. 이러한 현대적 변화를 중심으로, 빛의 표현이 예술적·기술적·환경적·심리적 차원에서 어떻게 표현되고 있는지 사례를 분석해보고자 한다.

### 2.1.2.1 예술적 매체

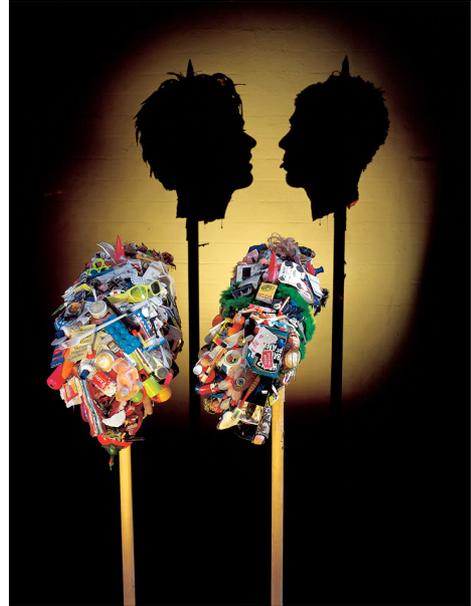
#### 1) Tim Noble & Sue Webster

영국의 예술가 팀 노블과 수 웹스터(Tim Noble & Sue Webster)는 그림자와 조명을 활용한 설치 작업을 통해, 빛이 형상을 드러내는 수단을 넘어 시각의 전환과 인식의 전환을 유도하는 조형언어로 작동할 수 있음을 보여주었다.

이들의 대표작 <Dirty White Trash (With Gulls)>(1998)는 6개월 동안 모은 생활 쓰레기를 작가 자신의 실루엣으로 투사한 작품으로, 빛의 방향성과 그림자의 형상화를 통해 ‘더러움’과 ‘인간성’, ‘현실’과 ‘환영’의 이중적 이미지를 극명하게 대비시킨다. 전작이자 그림자를 이용한 첫 번째 작품인 <Miss Understood & Mr Meanor>(1997) 역시 같은 형식을 취하고 있지만, 그림자 조형의 실험적 가능성을 탐구한 수준이었다면, Dirty White Trash에서는 빛·물질·공간이 통합된 구조 속에서 인식의 전환이라는 개념적 완성도를 보여주고 있다. 관객은 광원 앞의 무질서한 쓰레기 더미를 인식하다가, 조명이 비추는 벽면에 형성된 두 인물의 그림자를 마주하며 물질과 이미지, 실재의 상징 관계를 재사유하게 된다. 이때 빛은 단순히 오브제를 조명하는 기능적 역할을 넘어, 무질서한 물질에 내재된 형태를 드러내는 지각적 매개이자 인식의 구조를 구성하는 조형 요소로서 작용한다.



[그림 2-2] Dirty White Trash (With Gulls), 1998  
[http://www.timnobleandsuewebster.com/dirty\\_white\\_trash\\_1998.html](http://www.timnobleandsuewebster.com/dirty_white_trash_1998.html)



[그림 2-3] Miss Understood & MR Meanor, 1997  
[http://www.timnobleandsuewebster.com/miss\\_understood\\_1997.html](http://www.timnobleandsuewebster.com/miss_understood_1997.html)

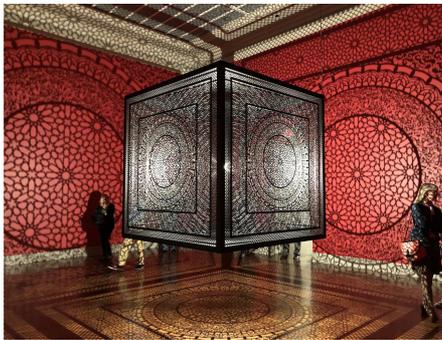
## 2) Anila Quayyum Agha

아니라 쿠아이움 아가(Anila Quayyum Agha)의 작품들은 일관되게 빛과 그림자의 관계를 통해 경계와 포용의 문제를 시각화한다. 레이저로 절단된 목재 큐브 내부에 단일 광원을 설치하여, 이슬람 건축의 자알리(Jaali) 문양이 사방의 벽면과 관람자의 몸 위로 투사되도록 구성되어 있다. 빛은 공간의 중심에서 사방으로 확산되며, 내부와 외부, 중심과 주변의 경계를 흐리게 한다. 관람자는 그림자와 무늬로 뒤덮인 공간 속에서 자신이 그 일부가 되는 경험을 하며, 포함되지 못한 존재가 예술적 구조 안에서 다시 통합되는 상징적 장면을 마주한다. 이러한 개념은 작가가 파키스탄의 이슬람 문화권에서 성장하며 경험한 여성으로서의 사회적 제약과, 이후 서구 사회로 이주한 후 느낀 이방성과 배제의 감각에서 비롯되었다.<sup>9)</sup> 작가는 인터뷰에서 “빛과 그림자의 관계는 곧 ‘나와 타자’의 관계이며, 하나

9) Nina Azzarello. (2021). *anila quayyum agha on how life experience led to an impassioned artistic exploration of light*. Milano: Designboom.

가 없으면 다른 하나도 존재할 수 없다”라 말하며, 대표작 <Intersections>(2014)을 통해 서로 다른 정체성들이 교차하고 반사되는 공존의 공간을 제시한다.<sup>10)</sup>

이후의 작품들은 대표작의 구조적 개념을 확장한 사례로, 빛과 문양, 그림자가 이루는 장식적 아름다움 속에서 타자에 대한 포용과 기억의 서사를 시각화한다. 이렇듯 아니라 쿠아이움 아가의 작업은 사회적 경계와 정체성의 문제를 재구성하는 인식의 언어로 다루고 있다.



[그림 2-4] Intersections (2013)  
<https://www.anilaagha.com/installation#/intersections/>



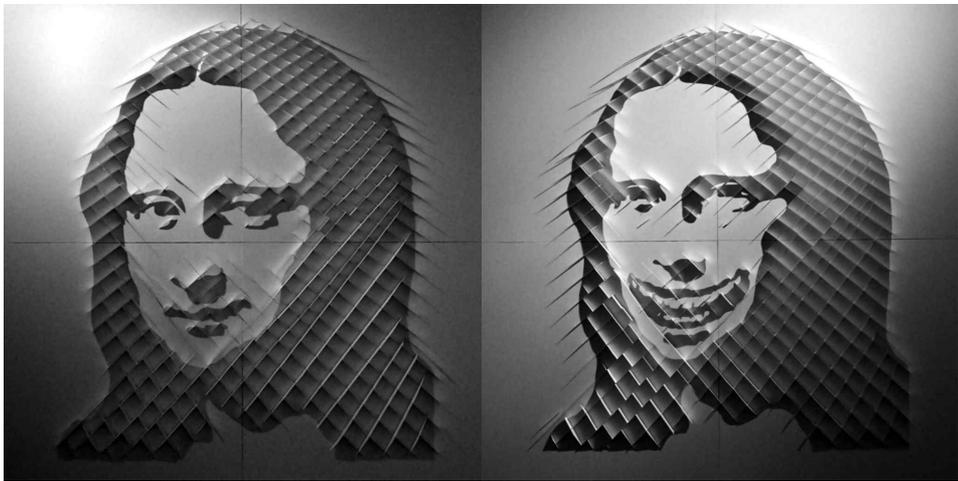
[그림 2-5] A Beautiful Despair (2021)  
<https://www.anilaagha.com/installation#/a-beautiful-despair/>

### 3) 전신종

본 연구자의 연구 주제와 진행 방법에 가장 큰 영감을 준 한국의 종합 예술 작가인 전신종의 작품은 빛의 반사·투사·굴절에 의해 생성되는 그림자와 상의 중첩을 매개로 새로운 조형 언어를 구축하고, 이를 통해 시각적 소통을 시도한다. 본 절에서 소개할 작가의 조형 실험은 실재하는 오브젝트보다, 빛이 만들어내는 그림자의 변형과 중첩을 중심으로 전개된다. [그림 2-6]의 <Shadow Trick>(2008)은 수직으로 세워진 얇은 판재들에 서로 다른 방향에서 광원을 투사하여, 하나의 작품 안에서 서로 다른 형상의 그림자가 교차·중첩되도록 설계된 설치작품이다. 관람자는 작품의 전면에서는 형태를 인지하기 어렵지만, 조명이 비치는 순간 그림자 이미지가 형성되면서 빛의 방향에 따라 시각적 유희를 경험

10) Sarah Lees. (2019). *In Conversation: Anila Quayyum Agha*. San Francisco: Medium.

하게 된다.<sup>11)</sup> 또, [그림 2-7]의 작품은 건물 외벽에 대형화 함으로써, 실험적 규모를 공공 공간으로 확장시킨 사례이다. 또, 야외에 설치되어 있기 때문에 태양광과 인공광원을 시간에 맞춰 적절하게 사용하여 그림자를 재현할 수 있도록 설계되어, 자연광과 인공광이 교차하는 환경 속에서도 조형적 형태가 지속적으로 드러나는 시스템을 구현하였다. 이러한 작품을 통해 빛의 물리적 특성과 환경 조건을 조형적 표현 요소로 통합하며, 빛의 방향·세기·시간에 따라 변화하는 그림자를 하나의 언어이자 관계적 매체로 제시한다.



[그림 2-6] Shadow Trick (2008)



[그림 2-7] Shadow Trick (2001)

11) 김수한, 전신중. (2024). 빛의 물리적 특성을 활용한 시각적 표현에 대한 연구 - 실험제작을 중심으로. 『기초조형학연구』, 25(5), pp. 128-129

## 2.1.2.2 디지털과 미디어의 융합

### 1) teamLab

예술가, 프로그래머, 엔지니어, 건축가 등 다양한 전문 인력이 모인 일본의 예술 집단 팀랩(teamLab)은 디지털 기술을 통해 빛·공간·관람자 간의 경계를 해체하는 인터랙티브 라이트 아트를 선보여왔다. 도쿄 MORI Building DIGITAL ART MUSEUM: teamLab Borderless 개관을 기념해 제작된 <Borderless Universe>(2018)는 수백 개의 프로젝터와 센서가 결합된 대규모 몰입형 공간 속에서 관람자의 움직임에 따라 이미지와 빛이 실시간으로 변화하는 데이터 기반 설치작이다.

이 작품은 물리적 경계가 없는 공간에서 빛의 궤적과 입자가 서로 연결되고, 관람자가 이동함에 따라 작품의 구성이 새롭게 생성·소멸한다. 팀랩은 “하나의 연속된, 경계 없는 세계(A continuous world without boundaries)”를 구현하고자 했으며, 빛과 영상이 공간의 물리적 구조를 초월해 관람자의 시각에 직접 질문을 던지는 매체로 기능한다.<sup>12)</sup> 이처럼 끊임없이 변화하는 데이터 시각화를 구현함으로써, 디지털 매체가 만들어낸 새로운 시각 경험 속에서 빛이 감각적·관계적 매체로 재정의되는 과정을 보여준다.



[그림 2-8] Universe of Water Particles on a Rock where People Gather  
<https://www.teamlab.art/ko/e/tokyo/>



[그림 2-9] The Infinite Crystal Universe  
<https://en.japantravel.com/tokyo/teamlab-planets-tokyo/45504>

12) Christina Petridou. (2024). *A Glimpse into TeamLab's Dazzling Installations at Borderless Museum in Tokyo's Azabudai Hills*. Milano: Designboom.

## 2) Refik Anadol

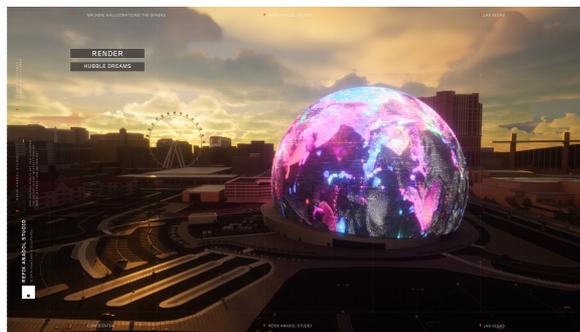
레픽 아나돌(Refik Anadol)은 데이터와 인공지능을 예술의 조형 재료로 삼아, 빛의 언어를 통해 인간과 기계의 협업적 창조성을 탐구하는 미디어 아티스트이다.<sup>13)</sup> 대표작 <Machine Hallucination>(2019)은 뉴욕의 공개 이미지 데이터를 AI로 학습시켜, 도시의 집단 기억을 인공지능의 신경망 속에서 재구성한 영상 설치작품이다. 거대한 파노라마 스크린에 투사된 빛의 파편과 색채의 흐름은 데이터가 스스로 시각적 형태를 생성하는 과정을 실시간으로 드러내며, 관람자는 도시와 기계의 가상 공간을 경험하게 된다. 이때, 빛은 정보의 시각화 수단을 넘어, 데이터가 기계를 통해 인간의 감각을 연결하는 인식적 매개체로 작동한다.<sup>14)</sup>



[그림 2-10] Machine Hallucination  
<https://refikanadol.com/works/machine-hallucination/>



[그림 2-11] Machine Hallucination : NYC  
<https://refikanadol.com/works/machine-hallucination/>



[그림 2-12] Machine Hallucinations — Sphere  
<https://refikanadol.com/works/machine-hallucinations-sphere/>

13) Refikanadol. (2024). *Biography*. Los Angeles: Refikanadol.

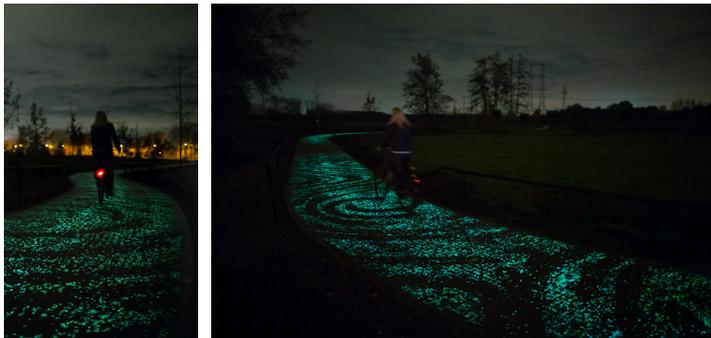
14) Refikanadol. (2020). *Machine Hallucination*. Los Angeles: Refikanadol.

### 3) Daan Roosegaarde

사회적 디자인 랩 기반의 다안 루스하르데(Daan Roosegaarde)는 사람과 기술을 결합해 도시 환경을 체험적으로 개선하는 공공 설치 미술을 지속해 왔다. 빛을 핵심 매체로 활용하여 안전, 생태, 공동체를 연결하는 관계적 조형 언어를 구축한다. 또 빛을 시각적 장치를 넘어 도시 환경 속에서 인간의 감각을 일깨우고 공동체적 상상력을 촉발하는 사회적 커뮤니케이션의 매개로 활용한다. 이렇듯 빛을 통해 인간, 기술, 환경이 공존하는 점진적 변화의 장을 시각화하고 있다.<sup>15)</sup>



[그림 2-13] Waterlicht  
<https://www.studioroosegaarde.net/project/waterlicht>



[그림 2-14] Van Gogh Path  
<https://www.studioroosegaarde.net/project/van-gogh-path>

---

15) Studio Roosegaarde. (2025). *Dream Factory in Rotterdam - About Us*. Netherlands: Studio Roosegaarde.

### 2.1.2.3 환경과 공공적 활용

#### 1) 범죄예방 및 안전 조명(CPTED)

CPTED(Crime Prevention Through Environmental Design)는 범죄예방설계로, 건축물·시설·공간 등에 대해 적절한 환경설계를 적용함으로써, 범죄발생 및 범죄로 인한 주민의 불안감을 저감하고, 안전하고 쾌적한 생활환경을 조성하여 지역사회 공동체를 활성화하는 전략이다.<sup>16)</sup> 이 전략의 목적은 물리적 또는 시각적 환경을 개선하여 범죄위험요소를 제거하고, 주민이 안전하다고 느낄 수 있는 환경을 구축하는 데 있다.<sup>17)</sup> CPTED는 공간 설계 단계에서부터 접근통제, 자연적 감시 확보, 영역성 강화 등의 개념을 통해 범죄기회를 줄이고, 주민의 행동 및 인식 변화에 기여할 수 있도록 한다.<sup>18)</sup> 또, CPTED는 단순한 조명 계획을 넘어, CCTV, 방범창, 비상벨, 노면 그래픽, 벽화 등 다양한 환경적 요소를 통합적으로 적용한다. 하지만 본 절에서는 이러한 다층적 요소 중에서도 빛의 조형적 기능을 중심으로 고찰한다.

[그림 2-15]의 안동시 사례에서는 현장 안전진단 결과를 토대로 우범지역에 빛 터널을 조성하여 경관 개선과 야간·심야 시간 보행자 안전을 확보하였으며,<sup>19)</sup> [그림 2-16]은 일본 미야기현에 설치된 푸른 가로등의 사진인데, 푸른색이 사람의 심리를 안정시키고 차분하게 하는 효과를 이용한 사례로, 범죄율이 30%가량 낮아지는 효과를 얻었다.<sup>20)</sup>

---

16) 한국셉테드학회. (2021). 『CPTED 개념 및 실천원리』. 서울: 한국셉테드학회.

17) 한국셉테드학회. (2021). 『CPTED 고시 및 기준』. 서울: 한국셉테드학회.

18) 강정식, 김충식. (2018). 활동성 강화를 통한 범죄예방환경설계(CPTED) 적용방안 연구. 『한국조경학회』, 추계 국제학술대회 논문집, p. 106.

19) 권달우. (2018). 『안동 범홍지하차도에 빛터널 조성』. 안동: adinews.

20) 조나리. (2014). 『도시 디자인으로 범죄율 낮춘다』. 부산: CIVIC news.



[그림 2-15] 안동시 범흥지하차도 빛터널  
<http://www.adinews.co.kr/news/articleView.html?idxno=37260>



[그림 2-16] 일본 미야기현 푸른 가로등  
<https://www.civicnews.com/news/articleView.html?idxno=1177>

## 2) Media Facade

파사드는 일반적으로 건축물의 주 입구가 있는 정면부, 즉 외벽 전체를 의미하며, 건축물의 외적 인상과 상징성을 결정하는 조형적 요소이다.<sup>21)</sup> 어원적으로는 라틴어 *facies*(얼굴, 외형)에서 유래하여, 건축의 얼굴을 뜻한다.<sup>22)</sup> 역사적으로 파사드는 시대의 건축양식, 재료, 기술의 발전과 함께 진화해 왔으며, 단순한 구조적 외피를 넘어 도시의 시각적 정체성을 구성하는 주요 표현 매체로 발전하였다.<sup>23)</sup>

21세기에 들어 디지털 기술과 결합하여 미디어 파사드(Media Facade)로 확장되었으며, 건물의 외피를 디지털 디스플레이 매체로 전환하여 영상·이미지·정보를 투사하는 시각 커뮤니케이션 방식으로, LED 조명이나 프로젝션 시스템을 통해 빛의 밝기와 색상, 움직임을 제어함으로써 건축물의 외벽을 하나의 대형 스크린으로 활용한다.<sup>24)</sup> 이는 전통적 건축 조명이 가지는 정적 장식의 역할을 넘어, 건축·예술·정보가 융합된 동적 매체이자 공공 커뮤니케이션 플랫폼으로 기능한다.

21) 장예, 남경숙. (2012). 건축 파사드의 디지털조명이 구현된 감성적 표현에 관한 연구. 『한국생활과학연구』, 32(1), p. 42.

22) 이승지, 박현찬. (2016). 서울시 미디어 파사드 설치현황과 관리방향 설정 연구. 『서울도시연구』, 17(2), pp. 13-28.

23) *ibid.* p. 42.

24) 박진희, 김재범, 김종덕. (2010). 상호작용 관점에서 본 미디어 파사드에 대한 연구 -LED를 이용한 미디어 파사드의 사례를 중심으로-. 『디자인학연구』, 23(4), p. 43.

결국 미디어 파사드는 도시 야간 경관 조명연출에서 시민 참여와 정보 공유가 이루어지는 공공 시각 네트워크로 확장시킨 사례라 할 수 있으며, 빛 도시 커뮤니티션과 사회적 상징 언어로 진화한 형태이다.



[그림 2-17] 서울스퀘어 미디어파사드  
<https://blog.naver.com/need97/220452223269>



[그림 2-18] Vivid Sydney  
<https://news.lgdisplay.com/2016/12>

### 3) 도시 축제형 조명 예술(Light Festival)

도시경관조명계획의 일환으로, 빛을 주요 매체로 활용하여 일정 기간 동안 특정 공공장소에서 기획적으로 진행되는 문화적 행사를 의미한다. 이는 단순한 조명 연출을 넘어, 도시의 시각적 환경과 정체성을 창의적으로 재구성하고, 시민에게 비일상적 체험을 제공하는 공공 문화행위로 정의된다.<sup>25)</sup>

도시 차원에서 축제형 조명 예술은 경제적·사회문화적·심리적 효과를 모두 포함한다. 경제적으로는 축제 개최에 따른 관광 수입, 관련 산업(조명·디자인·기술) 활성화, 지역 자원 개발 등 직·간접적 효과를 창출하며, 사회문화적으로는 지역 이미지 향상, 전통문화의 현대적 재해석, 지역민의 공동체 의식 강화 등의 효과를 가져온다.<sup>26)</sup> 이는 도시의 야간경관을 문화적 자원으로 재해석하는 동시에, 경제·관광·문화·정체성을 아우르는 융합적 도시 브랜드 전략으로 기능한다. 즉, 빛을 활용하여 공공예술, 도시마케팅, 지역활성화가 결합된 복합적 도시 플랫폼을 실현

25) 심승연. (2006). “도시경관조명계획에 있어서 빛이벤트 기획 및 활용방안에 관한 연구”. 건국대학교 대학원 석사학위논문. p. 6.

26) *ibid.*

하는 것이며, 이는 도시가 가지는 고유한 아이덴티티를 시각적으로 재해석하고 대외적 경쟁력을 강화하는 데 기여하는 전략적 매체로 작동한다.



[그림 2-19] 진주시 남강 유등축제  
<https://yudeung.com/photo/list/2025/1>



[그림 2-20] Lyon Festival of Lights  
<https://www.fetedeslumieres.lyon.fr/en/oeuvre/region-des-lumieres-fourviere?edition=2522>

## 2.2 빛을 활용한 형태 생성의 메커니즘

### 2.2.1 빛의 투영과 시각적 인지의 관계

빛은 형태를 인식하는 가장 근본적인 시각 정보로, 사물의 존재와 공간의 깊이를 인지하는 매개이다. 또, 인간은 사물에 투영된 빛의 양과 질, 명암 대비, 경계선의 뚜렷한 정도를 통해 사물의 구조와 형태를 해석한다.<sup>27)</sup> 이러한 시각적 해석 과정은 단순히 물리적 현상을 인식하는 차원을 넘어, 빛의 분포를 형태로 재구성하는 인지적 작용이라 할 수 있다.<sup>28)</sup>

게슈탈트 심리학에서는 이러한 인지 과정을 이해하는 중요한 단서를 제공한다. 게슈탈트는 ‘전체(whole)’, ‘윤곽(configuration)’, 혹은 ‘형태(form)’로 번역되며, 인간이 시각적 대상을 부분의 합이 아닌 의미 있는 전체로 인식하는 방식을 말한다. 이는 눈과 두뇌가 시각 자극을 조직화, 단순화, 통합화하여

27) 김진수, 홍경희. op.cit., pp. 16-17.

28) 변혁, 신규빈. (2012). 빛을 이용한 공간 표현에 대한 연구 : ‘파블로 발부에나’의 <증강된 조각 시리즈>를 중심으로. 『기초조형학연구』, 13(3), p. 181.

균형 잡힌 전체 이미지를 산출하는 과정으로 이해할 수 있다. 따라서 시각 정보가 부분적으로 제시되더라도, 인간은 이를 통합하여 완전한 형태로 지각하려는 성향을 가진다.<sup>29)</sup>

게슈탈트의 개념에서 ‘형(shape)’과 ‘형태(form)’는 밀접하지만 구분된다. ‘형’은 단순히 눈에 비치는 윤곽선의 시각적 결과이며, ‘형태’는 크기, 색채, 질감 등을 포함한 인지된 조형의 구조를 의미한다. 따라서 게슈탈트가 강한 형은 인식이 명확하고, 약한 형은 왜곡된 인상을 줄 수 있다.<sup>30)</sup> 이러한 인식 원리는 빛의 투영으로 생성되는 형상 또한 전체로써의 조형적 질서를 갖출 때 시각적, 안정적으로 인식된다는 사실을 시사한다.

결국, 빛에 의해 생성된 이미지는 물리적 투영의 결과이자 인지적으로 재구성된 형태이다. 이는 조형 예술의 영역에서 빛의 투영이 단순한 물리적 현상을 넘어, 지각적 구조를 기반으로 한 조형 행위로 확장될 수 있음을 보여준다. 본 연구는 이러한 시각적 인지의 메커니즘을 토대로, 빛의 물리적 투영을 통해 형상을 구현하고 조형적으로 표현하는 과정을 탐구하고자 한다.

## 2.2.2 빛의 투영 형상과 광원의 상호작용

광원으로부터 방사된 빛은 직진성을 유지하지만, 공기 중의 수분에 닿으면 스펙트럼이 분산되어 무지개가 형성되고, 유리나 물과 같은 밀도가 다른 매질을 통과할 때는 굴절로 인해 경로가 꺾이며, 거친 표면에서는 난반사로 인해 불규칙한 빛의 패턴이 만들어진다. 이는 단순한 물리적 현상이 아니라, 빛의 특성과 투과 면의 구조적 제약이 결합하여 새로운 형상 원리가 되는 조형적 메커니즘이라고 볼 수 있다.

---

29) 한국디자인학회. (2015). 『기초 디자인 교과서』. 서울: 안그래픽스 p. 140.

30) ibid. p. 140.



[그림 2-21] Light Projection and Light Source Interaction

본 연구는 연구자의 선행연구인 ‘빛의 물리적 특성을 활용한 시각적 표현에 대한 연구’(김수한, 전신중, 2024)에서 검증된 두 가지 가설인 타공의 형태와 크기에 따른 형상 변화, 그리고 광원의 위치 및 개수에 따른 형상 중첩을 토대로, 그 메커니즘을 조형적 측면에서 재해석하고 디지털 시뮬레이션 환경에서의 확장 가능성을 모색한다.

선행연구에서 제시된 첫 번째 가설은 ‘타공 패널을 지난 빛은 왜곡된 형상을 만들어내며, 타공의 형태와 왜곡된 형상 간의 상관관계를 분석하면 의도된 형상을 만들 수 있다’<sup>31)</sup>는 것이다. 이 가설은 빛의 직진성과 비례 관계를 근거로 하며, 실제 실험에서는 사각형·삼각형·원형 타공을 대상으로 투사된 형상의 변화를 정량적으로 분석하였다. 실험 결과, 타공 형태는 형상의 세로 길이와 명료도에 직접적인 영향을 미쳤으며, 단순 비례식으로는 설명되지 않는 왜곡이 관찰되었다. 이에 대해 연구자는 3D 모델링 시뮬레이션을 병행하여 빛의 경로를 수학적으로 역산함으로써 실제 형상과의 오차 범위를 최소화하였다.

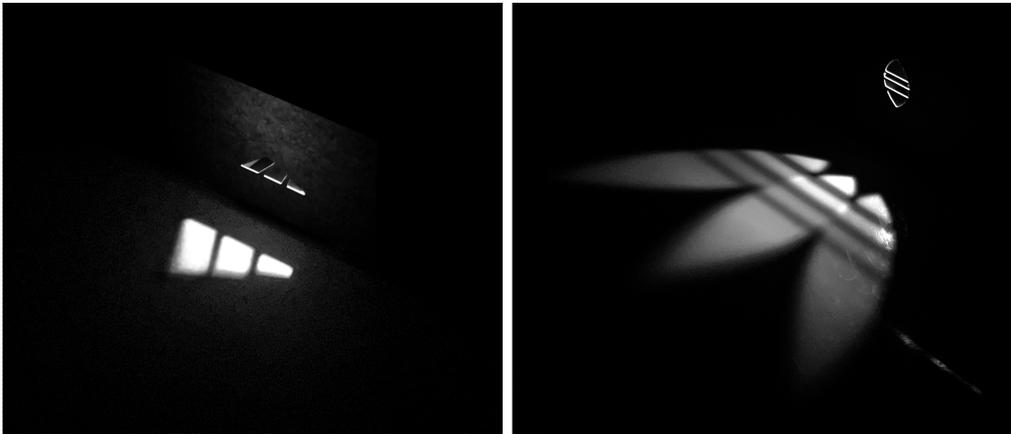
두 번째 가설은 ‘타공이 한 개일 때, 광원의 수와 맺히는 형상의 수는 동일하며, 형상이 교차하면 새로운 형태를 만들어 낼 수 있다’<sup>32)</sup>는 것이다. 이 실험에서는 동일한 타공에 다수의 광원을 적용하여 각기 다른 투영 패턴이 겹쳐질 때의 시각적 결과를 관찰하였다. 연구 결과, 2차 형상의 명료도와 생성 여부는 타공의 크기와 광원 간 거리의 상호작용에 의해 결정되며, 광원이 멀어질수록 형상의 세로폭이 늘어나고 반그림자의 비율이 커지는 경향이 나

31) 김수한, 전신중. (2024). op.cit., p. 130.

32) 김수한, 전신중. (2024). op.cit., p. 130.

타났다.

이러한 결과는, 빛의 투영이 단순한 물리적 현상이 아니라 조형적 구성행위로 확장될 수 있음을 실증적으로 보여준다. 타공 형태의 설계와 광원 배치의 조합은 예측 가능한 형상 생성의 근거가 되며, 이는 후속 연구에서 디지털 시뮬레이션 기반 자동화 시스템 구현으로 발전될 수 있는 기초 논리로 작용한다.



[그림 2-22] Experimental Results of Light Source Projection Shape Manufacturing, 2024

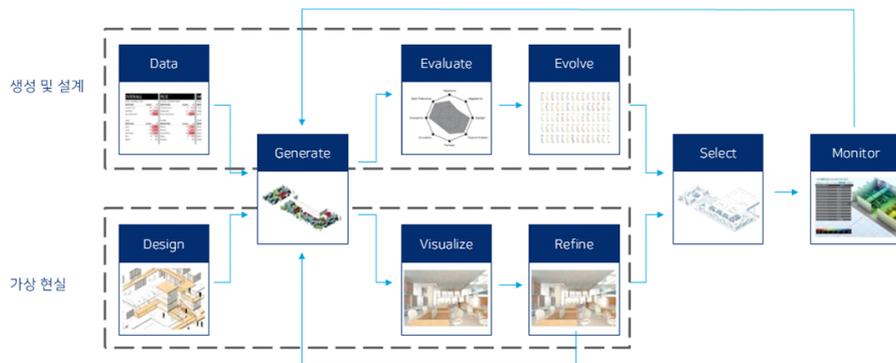
## 2.3 Computational Design과 Zero-code 기반 자동화 설계

### 2.3.1 Computational Design

컴퓨터이셔널 디자인(Computational Design)은 설계 과정 전반을 데이터 기반의 연산 구조로 전환하는 사고방식이자 방법론이다. 전통적 설계가 디자이너의 직관적 판단과 반복적 수정 과정에 의존했다면, 컴퓨터이셔널 디자인은 그 과정을 명시적인 규칙과 절차로 구조화하여 설계 자체를 하나의 시스템으로 다룬다. 다시 말해, 설계의 사고 과정을 알고리즘으로 변환하고, 입력과 출력의 관계를 수치적으로 정의함으로써 형태의 생성과 조합이 논리적 계산을 통해 재현 가능한 구조로 전환된다. 이러한 접근은 디자인을 단일 결과물로 한정하지 않고, 다양한

변수의 조합과 조건 변화에 따라 새로운 결과를 반복적으로 생성할 수 있는 체계적 프로세스로 이해한다.<sup>33)</sup>

컴퓨터이셔널 디자인의 작동 구조는 데이터 흐름(Data flow)을 기반으로 한다. 설계자는 형태나 공간을 직접 그리는 대신, 형태 생성에 영향을 미치는 요소들을 매개변수(parameter)로 설정하고, 이들을 알고리즘적 규칙으로 연결함으로써 설계의 논리를 시각적으로 구현한다. 이러한 환경은 시각적 프로그래밍 환경을 통해 구성되며, 프로그래밍 언어 대신 노드(Node)와 와이어(Wire)의 연결로 데이터의 입력-처리-출력을 제어한다.<sup>34)</sup> 이 구조는 설계자가 자신의 사고 과정을 명확히 시각화하도록 돕고, 알고리즘 수정만으로 수많은 형태 실험을 수행할 수 있게 한다. 즉, 설계 과정 전체가 변수의 조합과 데이터 흐름의 구조화를 통해 제어되는 연산적 시스템으로 재편되는 것이다.<sup>35)</sup>



[그림 2-23] Structural and Flow of Computational Design

또한, 이 개념은 단순히 물리 환경을 디지털로 재현하는 기술이 아니라, 새로운 형태와 관계를 생성하는 시스템으로 기능한다. 디지털 트윈(Digital Twin)이 현실 세계의 상태를 모니터링하고 복제하는 ‘재현적 시스템’이라면, 컴퓨터이셔널 디자인은 주어진 조건과 규칙을 조합하여 이전에 존재하지 않았던 구조를 탐색하

33) 김수한, 전신중. (2025). 빛의 물리적 특성을 활용한 시각적 표현에 대한 연구 2 - 디지털 시뮬레이션 자동화 시스템 구현을 중심으로. 『기초조형학연구』, 추계 국제학술대회 논문집, p. 66.

34) 김수한, 전신중. (2025). op.cit., p. 66.

35) 나성진. (2021). 대학 내 조정전공 교육과정에 있어 새로운 컴퓨터 미디어 수업의 필요와 개선 방안. 『한국조경학회지』, 49(1), pp. 56-58.

고 생성하는 과정에 초점을 둔 ‘생성적 시스템’이다.<sup>36)</sup> 이러한 특성은 물리적 제작 이전 단계에서 설계자의 조형 실험을 정량적·논리적으로 전개할 수 있게 하며, 시뮬레이션·최적화·디지털 패브리케이션(Digital Fabrication) 등과 결합될 때 설계와 제작 및 운영의 전 과정을 통합하는 확장된 설계 패러다임으로 발전한다.<sup>37)</sup>

컴퓨터이셔널 디자인의 발전은 디지털 기술의 비약적 발전과 더불어 이루어졌다. 20세기 후반 이후 컴퓨터의 연산 능력 향상과 알고리즘 기반의 설계 도구 개발은 건축과 조경, 조형 예술 등 여러 분야에서 설계 사고를 계산 가능한 논리 체계로 전환하는 계기가 되었다. 1990년대 후반부터 2000년대 초반까지는 3D 모델링 기술이 급속히 확산되면서 기존의 수작업 중심 제도 방식이 디지털 환경으로 대체되었으며, 콜럼비아대 건축대학원(GSAPP, Columbia University)의 페이퍼리스 스튜디오(Paperless Studios)는 이러한 변화를 주도적으로 실험에 반영한 대표적 사례로 평가된다.<sup>38)</sup> 이 시기의 실험은 자유곡면이나 비정형 구조의 정밀한 구현을 가능하게 하였고, 컴퓨터를 설계의 보조 수단이 아닌 조형적 사고의 확장 도구로 인식하게 하는 전환점을 형성하였다.<sup>39)</sup>

2000년대 중반 이후에는 하드웨어와 소프트웨어 기술의 발전이 본격적으로 설계 체계의 구조를 변화시키기 시작하였다. 이 시기에 컴퓨터 프로그래밍이 설계에 적극적으로 도입되면서, 컴퓨터는 재현(Representation)을 위한 수단에서 생성(Generative)을 위한 설계 매체로 전환되었다. 디지털 패브리케이션 기술의 발달은 복잡한 구조나 곡면 형태를 실제 규모로 구현할 수 있게 하였고, 컴퓨터이셔널 디자인은 BIM(Building Information Modeling)을 중심으로 한 관리적 시스템과 생성형 모델링(Generative Modeling)을 기반으로 한 생성적 설계로 양분되어 발전하였다. 전자는 건설 정보의 통합 관리와 효율성을 강조하였고, 후자는 알고리즘을 통한 형태 실험에 초점을 맞추었으나 양자 간의 간극이 커 상호 연계의 한계가 있었다.<sup>40)</sup>

36) 김수한, 전신중. (2025). op.cit., 66.

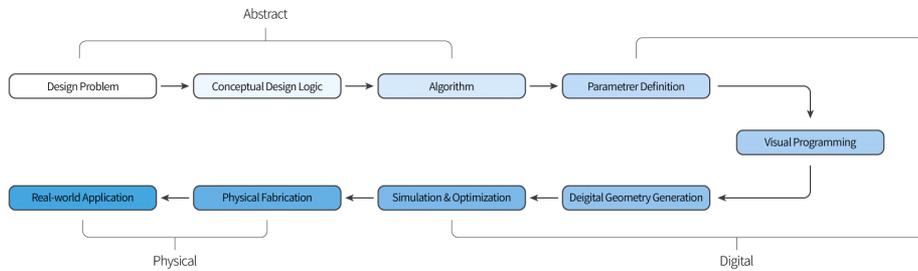
37) 박대권. (2018). 컴퓨터이셔널을 기반으로 한 건축디자인. 『KIBIM Magazine』, Special Issue, p. 18.

38) 천장환, Zack Soflin. 빅데이터 컴퓨터이셔널을 활용한 건축 디자인 프로세스에 관한 연구. 『디자인융복합학회』. 15(6), p. 41.

39) 박대권. op.cit., p. 19.

40) 천장환, Zack Soflin. op.cit., p. 41.

이후 라이노와 그래스호퍼와 같은 파라메트릭 설계 환경의 등장으로 알고리즘 설계가 보편화되었으며, BIM과의 결합을 통해 설계-시공-운영의 단계를 하나의 연속된 체계로 통합할 수 있게 되었다.<sup>41)</sup> 이러한 기술적 전환은 교육 환경과 설계 인식의 변화로 이어졌다. 새로운 컴퓨터 미디어의 도입은 설계 교육의 초점을 시각적 결과물 중심에서 데이터 기반의 사고 구조로 확장시켰으며, 시각적 프로그래밍 언어와 오픈소스 플랫폼의 보급은 비전문가도 알고리즘 설계를 수행할 수 있는 환경을 조성하였다.<sup>42)</sup> 더불어 디지털 세대의 등장은 이러한 기술을 빠르게 수용하게 하였고, 온라인 학습과 오픈소스 공유를 통해 컴퓨테이셔널 디자인의 저변을 확장시켰다. 예술 및 디자인 분야에서는 제로코드(Zero-code) 기반의 시뮬레이션 시스템이 활용되어 물리적 실험의 한계를 보완하고 조형 실험의 재현성과 효율성을 높이는 연구가 이루어졌다.<sup>43)</sup> 이와 같이 컴퓨테이셔널 디자인은 기술의 진보와 함께 교육적·인식적 변화를 거치며 발전하였으며, 오늘날에는 창의적 사고와 데이터 논리가 결합된 융합적 설계 패러다임으로 정착하였다.



[그림 2-24] Computational Design Thinking Hierarchy Chart

### 2.3.2 Algorithmic Thinking과 매개변수 설계

알고리즘적 사고(Algorithmic Thinking)는 설계 과정을 단계적 절차와 논리 구조로 인식하고, 문제해결을 위한 규칙을 체계적으로 정의하는 사고방식이다.

41) 나성진. op.cit., p. 57.

42) 나성진. op.cit., p. 58.

43) 김수한, 전신중. (2025). op.cit., p. 66.

또, 박세진(2019)은 알고리즘적 사고를 ‘문제 해결에 필요한 과정을 논리적·절차적으로 사고하는 능력이며, 효율적인 해결 방법을 찾고 단계별로 처리할 수 있는 사고능력’으로 정의하였다.<sup>44)</sup> 즉, 알고리즘 적 사고는 문제를 절차와 규칙의 관점에서 구조화하고, 실행 가능한 단계로 분해하여 해결 과정을 구성하는 능력을 의미한다. 설계적 맥락에서는 이는 조형의 생성 과정을 일련의 절차적 연산으로 인식하는 접근으로 확장되며, 설계자는 직관적 결정을 연산 가능한 데이터와 규칙으로 변환함으로써 컴퓨터가 이해할 수 있는 체계를 구축하게 된다. 결과적으로 알고리즘적 사고는 디자인의 직관적 과정과 디지털 연산의 논리 사이를 연결하는 인지적 매개체라 할 수 있다.<sup>45)</sup>

매개변수 설계(Parametric Design)는 이러한 알고리즘적 사고를 구체적인 설계 체계로 구현한 방식이다. 이는 설계의 구성 요소를 수치적·기하학적 매개변수로 정의하고, 각 변수 간의 관계를 수학적 또는 논리적 규칙으로 연결함으로써 하나의 변화가 전체 구조의 형태적 변화를 유도하는 시스템을 구축한다. 이 과정에서 형태는 고정된 결과물이 아니라 매개변수 간 상호작용에 의해 산출되는 결과값이라고 할 수 있다. 따라서 매개변수 설계는 형태를 직접 조작하기보다 변수 간의 의존 관계(dependency)를 정의하여 설계 전체를 제어하는 방법이며, 그 결과 설계자는 특정 조건의 변화를 통해 즉각적으로 다양한 형태를 탐색할 수 있는 동적 설계 환경(Dynamic Design Environment)을 구축할 수 있다.<sup>46)</sup>

결론적으로 알고리즘적 사고와 매개변수 설계는 상호 보완적인 관계를 형성한다. 전자가 설계 사고를 논리적 절차로 구조화하는 과정이라면, 후자는 그 논리를 데이터 간 관계로 구현하는 과정이다. 이 두 사고 구조의 결합은 설계를 단일 결과물의 생성이 아닌, 조건의 변화에 따라 스스로 진화하고 변형되는 생성적 시스템으로 전환시킨다.

---

44) 박세진. (2019). “비버챌린지 문제학습을 통한추상화 및 알고리즘적 사고연구”. 아주대학교 교육대학원 석사학위논문. p. 5.

45) 이남주. (2022). 『컴퓨터이셔널 디자인』. 서울: BOOKK, 16.2 명시적 기술: 알고리즘.

46) 전소현. (2023). “Grasshopper를 활용한 파라메트릭 포장 패턴 설계 기법 개발”. 서울대학교 환경대학원 석사학위논문. pp. 28-29.

### 2.3.3 Zero-code 설계 환경의 주요 프로그램

제로코드(Zero-code) 설계는 프로그래밍 언어를 직접 작성하지 않고, 시각적 인터페이스를 활용하여 알고리즘을 구성할 수 있는 설계 환경을 의미한다. 이러한 시스템은 비전문가나 디자이너도 코딩 지식 없이 알고리즘적 사고를 설계 과정에 적용할 수 있도록 하며, 시각적 노드와 와이어의 연결을 통해 데이터의 흐름과 논리를 구조화한다.<sup>47)</sup> 즉, 설계의 결과물뿐만 아니라 그 생성 과정 자체를 시각적으로 조작할 수 있도록 함으로써, 복잡한 프로그래밍 언어의 학습 없이도 자동화된 설계 시스템을 구축할 수 있는 환경을 제공한다.

본 절에서는 앞서 기술한 설계 환경을 구축할 수 있는 대표적 프로그램들의 구조와 특성을 고찰하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 프로그램의 설계 접근 방식과 실제 활용 가능성을 기준으로 Autodesk Dynamo, Houdini FX, TouchDesigner, Rhino+Grasshopper+Kangaroo의 네 가지 프로그램을 중심으로 분석하였다. 이들은 모두 프로그래밍 언어의 직접적인 사용 없이 시각적 연산과 매개변수 조작을 통해 설계 논리를 구현하는 방식을 채택하고 있으며, 컴퓨터이셔널 디자인의 자동화 구조를 실현하는 주요 도구로 평가된다.

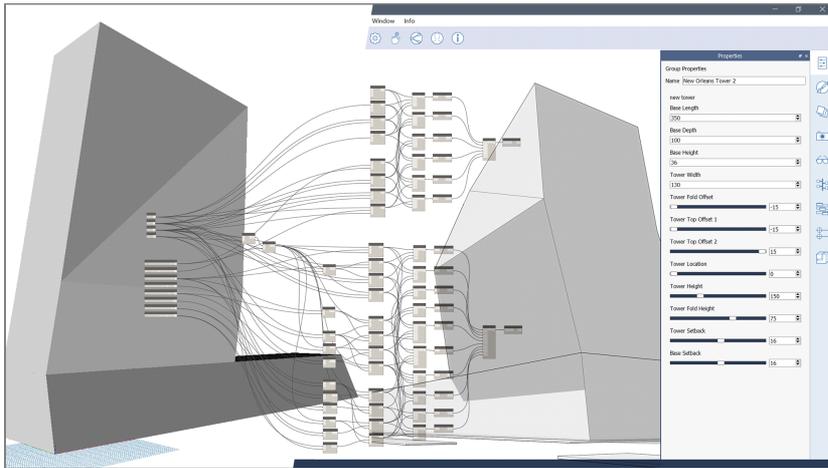
#### 2.3.3.1 Autodesk Dynamo

오토데스크(Aotodesk)의 다이نام오(Dynamo)는 BIM(Building Information Modeling) 환경 내에서 파라메트릭 모델링과 데이터 시각화를 동시에 수행할 수 있는 비주얼 프로그래밍 도구이다. 사용자는 다이نام오에서 노드들을 와이어로 연결하여 건축·조경 설계의 데이터 구조, 재료 정보, 공간 형상 등을 제어할 수 있으며, 입력된 매개 변수는 BIM 데이터와 연동되어 시공 및 유지관리 단계까지 일관된 정보 흐름을 유지한다. 이 시스템은 반복적인 계산, 패널 배치, 일조·에너지 분석 등의 프로세스를 자동화함으로써 설계 효율을 극대화하고, 데이터 기반의 설계 환경을 구현한다.<sup>48)</sup>

---

47) Appmaster. (2023). *Understanding the Differences: Zero-code, Low-Code, and Traditional Coding*. Philadelphia: Appmaster.

다이나모는 그래스호퍼와 유사한 사용환경을 가지고 있지만, 단순히 그래스호퍼를 모방한 도구가 아닌 데이터 중심의 설계 플랫폼이다. 따라서 건축, 조경, 엔지니어링 등 구조적·정보적 설계의 효율화에 적합하다.<sup>49)</sup>



[그림 2-25] Autodesk Dynamo BIM Usage Environments  
<https://dynamobim.org/qa-about-dynamo/>

### 2.3.3.2 Houdini FX

후디니 에프엑스(Houdini FX) 역시 노드 기반 절차적 생성(Procedural Generation) 시스템으로, 모델링·애니메이션·시뮬레이션 과정을 알고리즘적 논리에 따라 제어할 수 있는 설계 환경을 제공한다. 형태의 생성·변형 과정을 비파괴적(non-destructive) 방식으로 제어할 수 있다. 이러한 구조는 복잡한 조형 요소를 절차적 규칙에 따라 반복 생성하거나 변형할 수 있게 하며, 특히 물리 기반 시뮬레이션(Fluid, Pyro, Cloth, Destruction etc.)과 입자 효과(Particle FX) 분야에서 높은 효율성을 보인다.<sup>50)</sup>

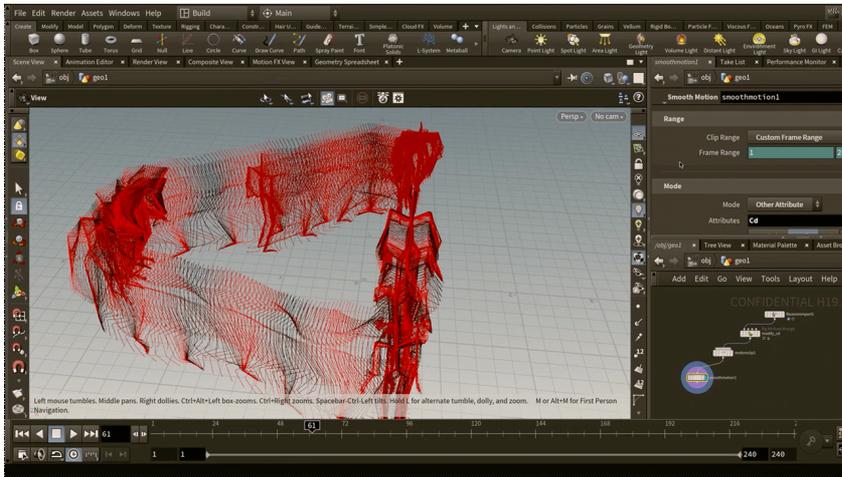
후디니는 본래 VFX, 게임 개발, 모션그래픽 등 영상 콘텐츠 제작 산업에

48) The Engineering Community. (2024). *How dynamo Can Transform Your AutoCAD Workflow: A Beginner's Guide*. Philadelphia: The Engineering Community.

49) Zach Kron. (2014). *Q&A about Dynamo*. San Francisco: Autodesk.

50) SideFX. (2025). *FX Features*. Toronto: SideFX.

특화되어 있으며, 절차적 워크플로우를 통해 복잡한 장면과 동적 시각 효과를 대규모로 처리할 수 있는 것이 큰 장점이다. 공식 문서에서는 이를 “Visual effects artists gravitate to Houdini because its procedural workflow is ideal for creating sophisticated particle and dynamic simulations”라고 명시하고 있다.<sup>51)</sup> 즉, 후디니는 고도의 시각효과와 동적 시뮬레이션을 데이터 기반 규칙으로 제어할 수 있는 프로그래밍 환경이라 할 수 있다.



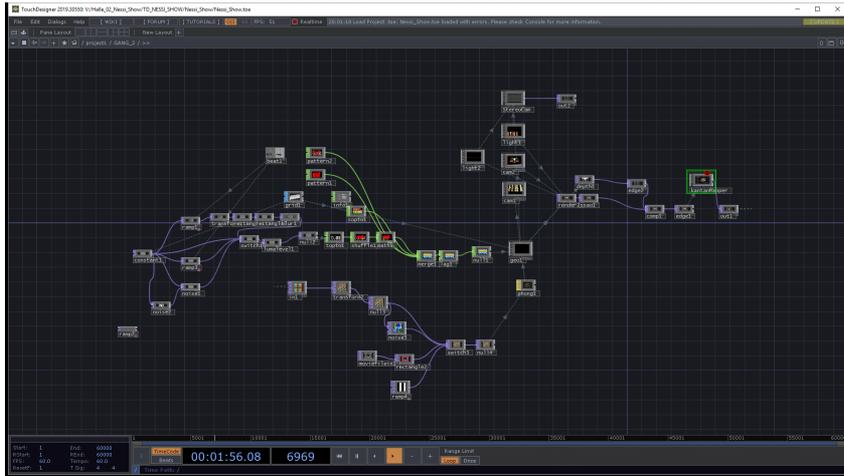
[그림 2-26] Houdini FX Usage Environments  
<https://www.sidefx.com/products/whats-new-in-195/>

### 2.3.3.3 TouchDesigner

터치디자이너(TouchDesigner)는 실시간 인터랙티브 시각화와 매체 설치·공간 기반 표현에 최적화된 설계 플랫폼이다. 사용자는 다양한 유형의 오퍼레이터(Operator)를 화면상에서 연결하여 이미지, 영상, 사운드, 센서 신호 등 여러 입력 데이터를 통합적으로 제어할 수 있으며, 이 데이터 흐름을 기반으로 즉각적인 시각적 피드백을 생성할 수 있다. 이러한 구조는 조명, 영상 프로젝션, 공연, 설치미술 등 시간성과 공간성이 결합된 미디어 아트 환경에서 반응형 콘텐츠를 제작하는 데 특히 유용하다. 또, 상기 프로그램의 시각적 인

51) SideFX. (2025). Fully Procedural. Toronto: SideFX.

터페이스는 단순히 그래픽을 구성하는 도구를 넘어, 데이터 처리, 연산, 시각 출력 과정을 하나의 네트워크로 통합하는 구조를 갖는다. 따라서 설계자는 노드 간 연결 관계를 조정함으로써 시각·청각적 요소의 상호작용을 실험하거나 환경 변화에 반응하는 조형적 결과를 실시간으로 제어할 수 있다.<sup>52)</sup>



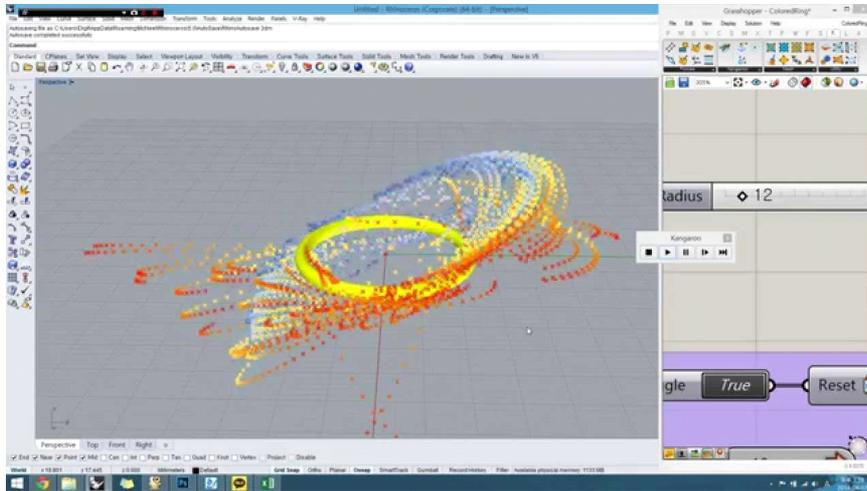
[그림 2-27] TouchDesigner Usage Environments  
<https://derivative.ca/course/introduction-visual-programming-touchdesigner/62889>

### 2.3.3.4 Rhinoceros, Grasshopper, Kangaroo

상기 세 프로그램과는 다르게 라이노, 그래스호퍼, 캥가루는 상호 연동되는 하나의 통합 설계 환경을 구성한다. 라이노가 3차원 기하(Geometry)의 기본적인 표현 공간을 제공하고, 그래스호퍼는 그 위에 비주얼 프로그래밍 방식을 통해 형태 생성 과정을 절차적 규칙과 매개변수로 제어하는 역할을 한다. 이때, 캥가루는 그래스호퍼의 알고리즘 구조와 연결되는 물리 연산 엔진(Physics Solver)으로, 중력, 장력, 압력, 반발력 등 물리적 조건을 알고리즘적으로 계산하여 기하 형태의 변화를 시뮬레이션한다. 이를 통해 형태 최적화를 실시간으로 수행함으로써, 설계 데이터의 입력부터 결과의 시각화까지 하나의

52) Stefan Kraus, Mxzehn. (2020). *Introduction to Visual Programming with Touchdesigner*. Toronto: Derivative.

순환적 과정을 형성한다. 53)



[그림 2-28] Rhinoceros and Grasshopper with Kangaroo Usage Environments  
<https://www.youtube.com/watch?v=3Hec7pfx66A>

이와 같이 다양한 제로코드 설계 프로그램들이 존재하지만, 본 연구에서 수행하고자 하는 빛의 투영 자동화 실험에는 라이노와 그래스호퍼의 환경이 가장 적합한 설계 플랫폼으로 판단했다. 두 프로그램은 알고리즘적 설계 구조를 시각적으로 구현할 수 있을 뿐 아니라, 정밀한 기하 제어와 매개변수 연산을 통합적으로 수행할 수 있어 본 연구에서 요구하는 형태 생성과 투영 경로의 계산적 실험에 효과적이다. 반면, 캥가루의 물리 시뮬레이션 기능은 구조적 거동이나 하중 해석과 같은 물리적 안정성 검증에 특화되어 있어 본 연구의 목적과 직접적인 연관성이 높지 않다고 판단했다. 따라서 상기 두 프로그램의 적합성과 연구 적용 가능성과 구체적 활용 방식은 다음 장에서 상세히 기술한다.

---

53) Rhinoceros. (2025). *Rhino in Architecture, Engineering and Construction*. Seattle: Robert McNeel & Associates.

## Ⅲ. 실험 도구 구성 및 연구 설계

### 3.1 시스템 구현을 위한 도구 구성

#### 3.1.1 Rhinoceros와 Grasshopper의 적용 가능성

##### 3.1.1.1 Rhinoceros의 역할 및 특징

라이노(Rhinoceros)는 복잡한 기하 구조를 정밀하게 3차원 형상 모델링을 수행할 수 있는 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) 기반 소프트웨어로<sup>54)</sup>, 건축, 산업디자인, 예술 및 조형 창작 등 다양한 분야에서 폭넓게 사용되고 있다. NURBS 모델링 방식은 다각형(Mesh) 기반 모델링에 비해 곡면의 수학적 정의가 정밀하고 연속성이 높아, 자유곡면의 변형이나 복합적인 유기적 형태를 구현할 수 있다는 장점을 지닌다. 이러한 특성은 디지털 모델에서 프로토타입 제작이나 양산으로의 확장이 가능하다. 또, 라이노는 다양한 형식의 3D 데이터 입출력을 지원하여, CAD·CAM 시스템, 3D 프린터, CNC 장비 등 실제 제작 환경과의 연동성이 뛰어나다.<sup>55)</sup>

이를 통해 디지털 설계와 물리적 제작 사이의 간극을 줄이고, 설계에서 제작으로 이어지는 일련의 공정을 통합적으로 관리할 수 있는 기반을 제공한다. 또한, 전개도, 제작 도면, 조립 가이드 등의 산출물 생성이 용이하여, 디자인의 시각적 완성도와 제작 효율성을 동시에 확보할 수 있다.

이러한 기능적 특성으로 인해 라이노는 단순히 조형 제작을 위한 모델링 도구를 넘어, 디지털 설계의 정밀한 검증 도구이자 실제 제작 데이터를 생성하는 핵심 플랫폼으로 기능한다.

---

54) Rhinoceros. (2019). *Rhino Features*. Seattle: Robert McNeel & Associates.

55) *ibid.*

### 3.1.1.2 Grasshopper의 역할 및 특징

그래스호퍼(Grasshopper)는 라이노의 사용환경에 탑재된 그래픽얼 알고리즘(Graphical Algorithm) 편집기로, 제로코드 기반의 알고리즘 설계 도구이다.<sup>56)</sup> Python이나 C#과 같은 프로그래밍 언어와 달리, 프로그래밍이나 스크립팅에 대한 사전 지식 없이도 사용자가 시각적 인터페이스를 통해 수학적 연산, 조건 제어, 반복 구조 등의 논리를 조합하여 형상을 생성하는 알고리즘 시스템을 구축할 수 있다. 이 프로그램의 가장 큰 강점은 매개변수설계를 실현할 수 있다는 점이다. 형태를 구성하는 요소를 변수로 설정하고, 그 상호관계를 수식으로 정의함으로써, 하나의 값의 변화가 전체 형태에 즉시 반영되는 유기적 설계 구조를 구현할 수 있다.<sup>57)</sup>

또한, 그래스호퍼는 Python, Excel, Ladybug 등의 외부 데이터와의 연동을 지원하여 환경 변화나 수치 데이터에 따른 형태의 자동 재구성 및 실시간 시뮬레이션이 가능하다. 이를 통해 복잡한 조형 원리를 시각적으로 이해하고, 빛의 입사각에 따른 그림자의 형성 범위, 광량에 따른 온도변화 등의 변수를 실험적으로 검증할 수 있는 데이터 기반 설계 환경을 제공한다.<sup>58)</sup>

결과적으로 그래스호퍼는 라이노의 정밀한 모델링 기능 위에서 작동하는 논리적·수학적 확장 플랫폼으로, 디자인 과정의 자동화, 반복 실험의 효율화, 그리고 시각적 검증을 가능하게 하는 핵심 도구로 평가된다.

### 3.1.1.3 결합을 통한 연구 적용 가능성

라이노와 그래스호퍼의 결합은 단순한 설계 도구를 넘어, 형태 생성 과정을 분석하고 자동화 설계 시스템을 구축할 수 있는 연구 플랫폼으로 발전시킬 수 있다고 판단했다. 라이노가 정밀한 형상 구현과 제작 데이터를 담당한다면, 그래스호퍼는 그 형상을 생성하고 변형시키는 논리적·수학적 알고리즘

---

56) Rhinoceros. op.cit.

57) 전소현. op.cit.

58) Rhinoceros. op.cit.

을 제어한다.

이 두 프로그램은 다음과 같은 세 가지 응용 가능성을 가진다.

### (1) 설계 효율성과 정밀성 확보

두 프로그램의 연계는 형태 설계의 효율성과 정밀성을 동시에 향상시킬 수 있는 환경을 제공한다. 복잡한 구조나 반복적인 형태를 자동으로 생성하고 수정할 수 있어, 설계자의 직관적 조형 설계 과정이 데이터 기반의 체계적 프로세스로 확장된다. 이를 통해 다양한 설계 실험을 빠르게 시도하고, 결과를 즉각적으로 피드백 받을 수 있는 실시간 설계 가능하다.

### (2) 자동화 설계 시스템 구축

그래스호퍼의 알고리즘 구조는 일정한 규칙과 변수의 관계에 따라 형태를 자동으로 생성·조정함으로써, 반복적이거나 수작업 중심의 설계 단계를 대폭 단축시킨다. 이러한 자동화는 디자인 과정 전반의 효율성을 높이는 동시에, 실험적 설계와 제작 프로세스를 표준화하고 재현 가능한 설계 환경을 구축하는 기반이 된다.

### (3) 디지털-물리적 제작의 통합

라이노와 그래스호퍼의 결합은 디지털 모델링과 물리적 제작을 하나의 연속된 과정으로 통합시킨다. 그래스호퍼에서 구축된 알고리즘을 라이노에서 실시간으로 모델링하고, 이를 제작 파일로 변환하여 3D 프린팅, CNC 가공 등 실제 제작 단계로 즉시 연결할 수 있다. 이러한 연계는 디지털 설계 결과가 물리적 결과물로 빠르게 전환되는 피드백 기반 제작 프로세스를 가능하게 하며, 디자인 실무뿐 아니라 연구 환경에서도 디지털-물리적 상호 작용 구조를 형성할 수 있는 잠재력을 가진다.

### 3.1.2 Rhinoceros와 Grasshopper의 데이터 처리 구조

그래스호퍼의 시뮬레이션 환경은 노드 기반(Visual node-based) 인터페이스를 중심으로 구성된다. 작동 방식은 컴포넌트(Component)와 데이터 흐름(Data flow)의 연결 구조로 설명 가능하다.

각 컴포넌트는 특정 기능이나 연산을 수행하는 단위이며, 입력과 출력 포트를 통해 서로 연결된다. 사용자는 이러한 노드들을 직관적으로 배치하고, 포트를 와이어(Wire)로 연결하여 데이터 처리 순서와 관계를 시각적으로 설계할 수 있다. 즉, 알고리즘의 논리 구조가 코드가 아닌 시각적 연결망으로 표현되는 것이다. 이러한 데이터 흐름은 선형적이거나 반복적인 계산 과정 모두를 유연하게 다룰 수 있다. 예를 들어 수치 데이터는 넘버 슬라이더(Number Slider)를 통해 실시간으로 제어되며, 곡선·면·입체와 같은 형상 데이터는 라이노에서 참조되어 그래스호퍼 내의 파라미터 노드로 전달된다. 이후 각 연산 노드에서 산출된 결과값은 다음 단계의 컴포넌트로 전달되며, 연산 체인의 마지막 출력은 라이노 공간에서 시각적으로 즉시 확인 가능하다.

다음으로, 데이터 구조는 리스트(List)와 데이터 트리(Data tree) 형태로 관리된다. 단일 입력값은 리스트로, 반복되거나 계층적 구조를 가진 데이터는 트리 구조로 저장되어, 동일한 연산이라도 데이터의 조직 방식에 따라 상이한 결과를 도출할 수 있다. 이러한 구조는 수많은 입력 변수를 동시에 처리할 수 있게 하며, 매개변수의 조합과 반복 실험을 자동화하는 기반이 된다.

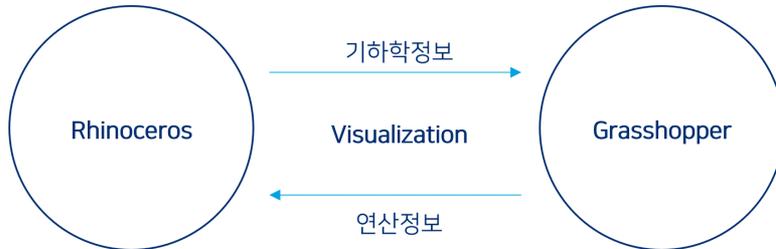
데이터의 처리 과정은 다음과 같이 크게 세 단계로 구분된다.

(1) 라이노에서 참조된 곡선, 면, 입체 등의 기하학적 정보가 그래스호퍼의 입력 파라미터로 전달된다.

(2) 연결된 노드 간 연산을 통해 데이터가 변환·재구성되며, 각 단계의 결과는 시각적으로 피드백된다.

(3) 최종 산출된 데이터는 필요에 따라 라이노로 다시 내보내어 실제 형

상 객체로 변환되거나, 외부 분석 도구(예: Excel, Python 스크립트 등)로 전송되어 수치 분석에 활용된다.



[그림 3-1] Data Processing Structure for Rhino and Grasshopper

이와 같은 노드 기반의 시각적 연산 체계는 데이터의 흐름과 알고리즘 구조를 명확하게 드러내기 때문에, 설계자가 실험 조건을 직관적이며 효율적으로 수행할 수 있게 한다. 또한, 각 노드 단위의 연산 결과를 독립적으로 확인할 수 있어, 오류 검출과 변수 조정이 용이하다. 결과적으로 그래스호퍼의 데이터 처리 구조는 복잡한 조형 연산을 시각화하고, 데이터 중심의 설계 과정을 단계적으로 해석할 수 있는 환경을 제공한다. 이는 이후 연구 모델을 적용하기 이전 단계에서, 시뮬레이션의 기초 체계와 데이터 흐름을 확립하기 위한 핵심적·기술적 기반으로 기능한다.

## 3.2 실험 시스템 설계를 위한 개념과 방법

### 3.2.1 실험 시스템의 구성 개념

본 절에서는 컴퓨터이셔널 설계 환경에서 빛 투영에 따른 형상 생성 과정을 체계화하고, 이를 기반으로 실제 응용 및 제작으로 확장 가능한 디지털 설계 시스템의 구조적 개념을 제시한다. 실험의 전체 시스템은 라이노와 그래스호퍼의 연동 구조를 중심으로 구성된다. 라이노는 공간 내에서 물리적 형상을 생성하며, 그 결과를 시각적으로 표현하는 기능을 담당한다. 그래스호퍼는 변

수 제어와 연산 과정을 시각적으로 연결하는 매개체로 작동한다. 두 도구는 상호 참조되는 데이터 구조를 통해 모델링과 시뮬레이션을 통합하며, 이로써 실험의 절차적 흐름을 하나의 시스템 안에서 수행할 수 있다.

본 실험 시스템의 기본 구조는 입력(Input)-처리(Process)-출력(Output)의 세 단계로 구성된다.

(1) 입력 단계에서는 실험 조건 설정을 위한 기초 데이터인 광원의 위치와 각도, 패널의 구성, 투영면의 범위와 위치가 변수로 정의된다.

(2) 처리 단계에서는 그래스호퍼의 비주얼 프로그래밍 환경을 통해 입력값이 연산 네트워크로 배치되며, 각 연산 노드는 실시간으로 결과 변화를 반영한다.

(3) 출력 단계에서는 연산 결과가 라이노 상에서 형상으로 시각화되고, 수치데이터로 변환이 가능하여 후속 분석 단계에 활용된다.

이때, 생성된 시각적 결과는 단순한 이미지가 아니라, 조건-변수-형상 간의 상관관계를 추적할 수 있는 구조적 데이터로 기능한다. 즉, 실험의 결과는 시뮬레이터 화면에 나타난 형상뿐 아니라, 그 형상을 산출한 변수 조합과 연산 과정 전체를 포함한다. 결과적으로 본 실험 시스템은 디지털 시뮬레이션 환경 속에서 형상 생성의 과정을 절차화 하고, 변수 간 관계를 시각적으로 해석할 수 있도록 하는 조형적 분석 프레임으로 작동한다.

### 3.2.2 실험 시스템의 구축 방법

연구자의 선행연구에서 수작업을 통한 물리적 실험을 통해 수행되었던 빛 투영 형상 생성 과정을 디지털 시뮬레이션 환경에서 구현하고, 이를 기반으로 실험 시스템이 실제로 구현 가능한지에 대해 검증하는 절차를 제시한다. 선행 연구는 광원의 위치, 패널의 타공 구조, 투영면의 배치 등 물리적 요소의 조

합을 통해 투사 형상의 변화를 분석하는 방식으로 이루어졌으나, 이러한 방식은 조건 변화에 따른 반복 실험을 수행해야 하는 어려움이 있으며, 정량적 분석에 한계가 존재하였다.

이에 따라 기존 실험 구조를 디지털 시뮬레이션 환경에 맞추어 재현하는 과정을 제시하고, 이어서 투영 형상으로부터 패널 정보를 역산하여 도출하는 역설계 절차를 단계적으로 설명한다.

### 3.2.2.1 선행 실험의 디지털 재현

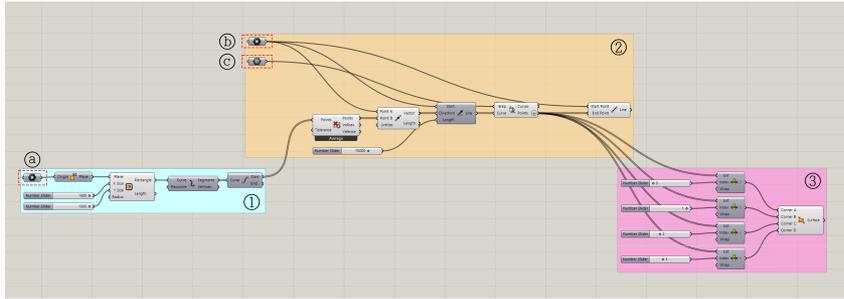
선행연구의 실험에서 사용된 실험 장치는 [그림 3-1]과 같다. 이 장치는 전면과 상부가 개방된 직육면체 구조로, 빛 샘 현상을 최소화하기 위해 검은 색 판재로 제작되었다. 전면에는 타공 패널을 교체·장착할 수 있는 슬라이딩 방식의 가이드 레일을 설치하였으며, 내부에는 광원의 위치를 조절할 수 있는 이동식 구조물을 배치하였다.<sup>59)</sup>



[그림 3-1] Light Source Projection Shape Experiment Device(2024)

상기 물리적 장치를 디지털 시뮬레이션 환경에서 재현하기 위해서는, 패널 생성부터 광원 투사, 투영 형상의 산출에 이르는 과정을 단계적으로 구조화해야 한다. 이에 따라 실험 요소를 그래스호퍼를 통해 입력-처리-출력의 세 단계로 재편하여 알고리즘화하였고, 전체 절차는 [그림 3-2]의 순서대로 구성된다.

59) 김수한, 전신중 (2024). op.cit., pp. 25-32



[그림 3-2] Light Source Projection Algorithm

본 시스템의 매개변수와 진행 과정은 ① 패널 구성(입력), ② 빛의 경로 계산(처리), ③ 투영면 결과 형상화(출력) 과정에 따라 세 단계로 분류할 수 있으며, [표 3-1]에 정리하였다.

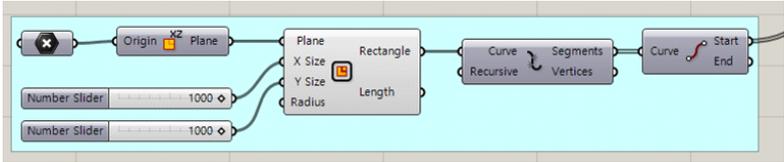
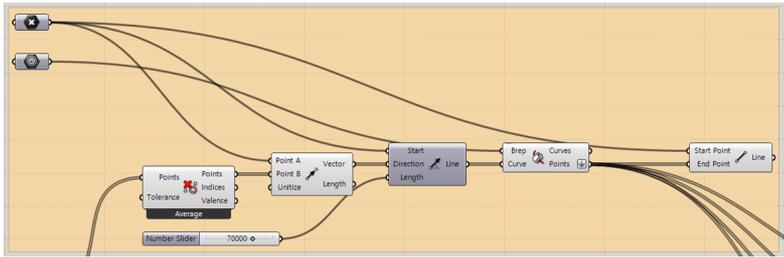
④는 타공 패널의 시작 기준점으로, 패널 형상의 생성 과정에서 모든 좌표 연산의 기준이 되는 지점이다. 이 기준점을 바탕으로 ①단계에서는 패널의 크기와 형상을 정의하고, 설정된 값에 따라 타공의 기본 구조를 형성한다.

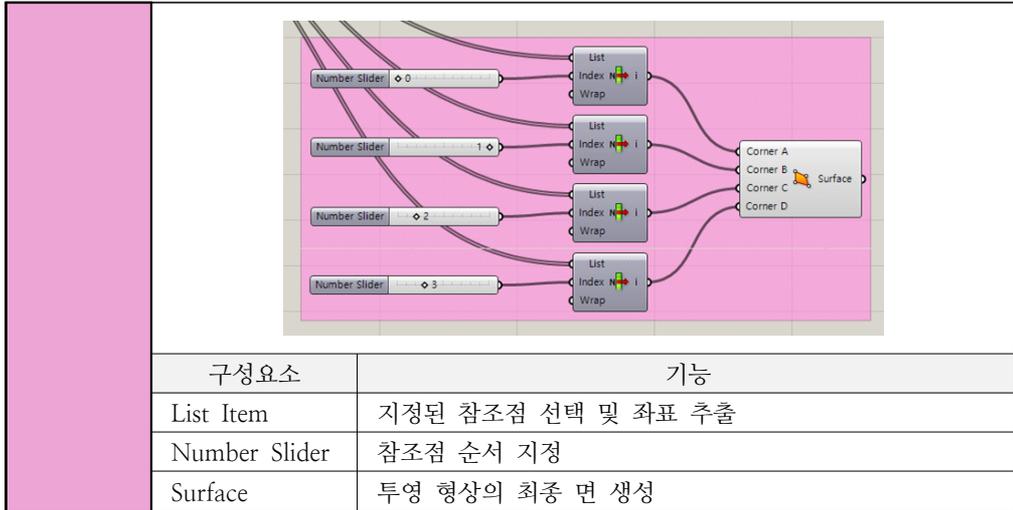
⑤는 광원을 의미하며, ②단계에서 광원의 위치와 방향 값이 벡터로 변환되어 타공의 각 분할점으로부터 투영면까지 이어지는 빛의 경로를 계산하는데 활용된다. 이 단계에서는 타공 패널을 통과한 빛이 투영면과 만나는 교차점을 추출하고, 광선의 실제 경로를 시각적으로 확인하는 과정이 포함된다.

⑥는 투영면을 나타내며, ③단계에서 광원으로부터 투사된 빛이 도달하여 형상을 이루는 최종 결과물이 생성되는 영역이다. 이 과정에서는 투영면에서 추출된 네 개의 교차점을 기반으로 하나의 면(Surface)을 구성하여, 디지털 시뮬레이션 환경에서 투사 형상을 최종적으로 시각화한다.

[표 3-1] Details of the Light Source Projection Algorithm

절차 단계	세부 내용	
① 패널 구성 (입력)	매개변수 (타공 패널)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 패널의 기준 좌표</li> <li>• 패널의 크기(X Size / Y Size)</li> <li>• 분할 개수</li> <li>• 패널의 평면 방향</li> </ul>

		
	구성요소	기능
	Rectangle	패널의 타공 형상
	Number Slider	타공 크기 정의
	Explode	타공 윤곽 개별요소 분리
End Points	투영 형상의 꼭지점 좌표 추출	
② 빛의 경로 계산 (처리)	매개변수 (광원)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 광원의 위치</li> <li>• 광원의 방향 벡터</li> </ul>
		
	구성요소	기능
	Average	꼭지점 좌표를 평균하여 패널의 중심점 산출
	Vector 2Pt	빛의 방향 벡터 생성
	Line SDL	빛의 투사 경로 생성
Brep   Curve	빛과 투영면 간의 교차점 계산	
Line	광선의 실제 도달위치 시각적 표현	
③ 투영면 결과 형상화 (출력)	투영면	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 투영면의 방위 및 크기</li> </ul>
	매개변수  결과 형상	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 투영면의 참조값</li> <li>• 형상 면 구성 방식</li> </ul>



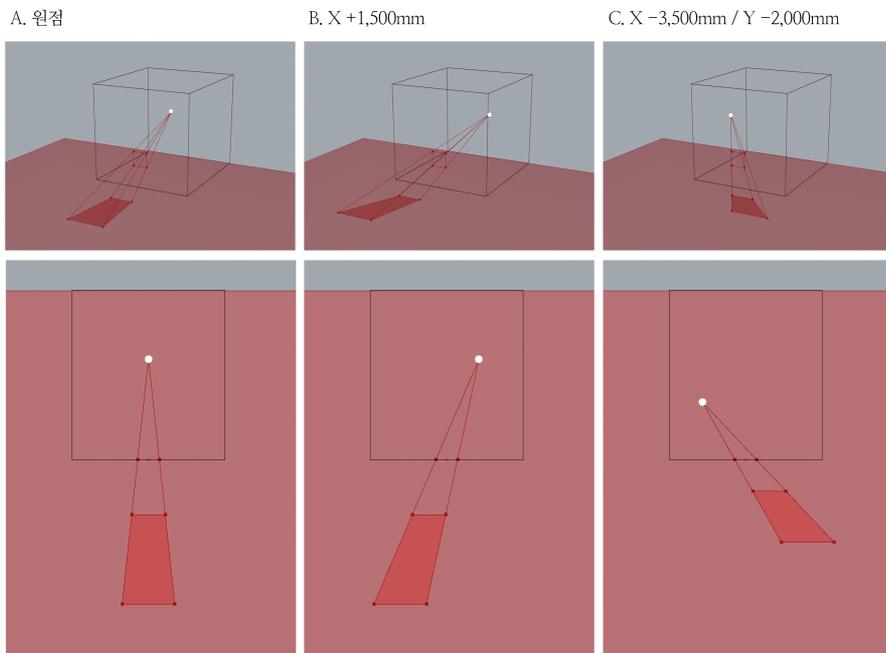
[그림 3-3]의 항목 A는 상기 과정을 통해 구성한 알고리즘 절차가 라이노 환경에서 시각화된 결과이다. 화면의 검은색 육면체는 물리적 실험 장치를 단순화하여 모델링한 것으로, 광원의 위치와 타공 패널의 상대적 배치를 확인하기 위한 참조 구조로 사용되었다. 이는 실험 장치의 외형만을 나타내고, 빛의 궤적을 명확하게 시각화하기 위해 외벽을 생략한 것이다. 또, 여러 개의 광선이 수렴하여 시작되는 지점은 알고리즘에서 설정된 광원(㉞)을 의미하며 (구분의 편의를 위해 흰색 원형 점으로 표시), 물리적 실험에서 LED 광원을 디지털 시뮬레이션 환경에서 대응한 것이다.

육면체의 전면부에 위치한 정사각형 형태(㉠)는 ①패널 구성(입력) 단계의 타공 분할점을 기반으로 생성된 영역이며, 패널을 통과한 후 투영면으로 향하는 빨간색 선분은 ②빛의 경로 계산(처리) 단계이며, 선분은 알고리즘 처리 단계에서 생성된 빛의 방향벡터(Line)이며, 각 분할점을 중심으로 계산된 방향벡터가 투영면과 만나는 지점을 보여준다.

마지막 ③투영면 결과 형상화(출력) 단계의 바닥의 붉은색 평면은 투영면(㉡)을 나타내며, 투사된 빛이 도달하는 위치를 확인하기 위한 기준으로 사용된다. 투영면 위에 나타난 꼭짓점은 투영면 상의 투사 지점에 해당하며, 이는 알고리즘에서 계산된 교차점의 연산 결과이다. 이 점들을 연결하여 생성된 다각형은 최종 출력 단계에서 면으로 구성되는 데이터가 된다.

이때, [그림 3-3]의 항목 B, C는 알고리즘의 정상 작동 여부를 검토하기

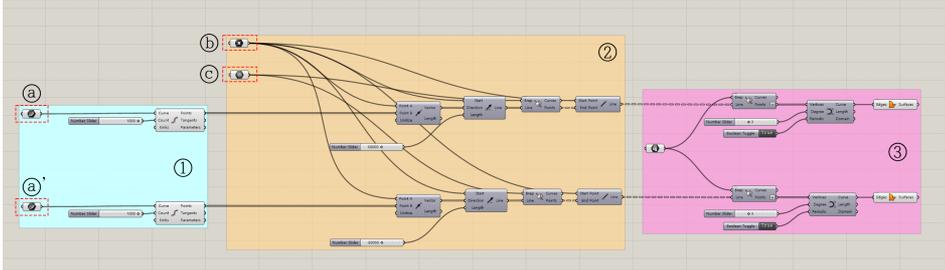
위해 매개변수 중 광원 위치를 연속적으로 변위 시키며 투영 형상의 변화를 도식화하였다. 이러한 시각적 결과는 광원의 이동이 투영 형상에 미치는 영향이 디지털 시뮬레이션 환경에서도 물리적 실험과 동일한 패턴으로 나타남을 보여준다. 또, 물리 실험 장치에서 광원의 이동이 단일 축을 중심으로 제한되었던 것과 달리, 디지털 시뮬레이션 환경에서는 광원의 위치를 X·Y·Z 축 전 방향으로 설정할 수 있어, 공간적 변위에 따른 투영 형상의 변화를 다차원적으로 검토할 수 있게 되었다.



[그림 3-3] Digital Simulation of the Light Source Projection Algorithm

### 3.2.2.2 역설계 시스템 구성

역설계 시스템은 목표 투영 형상으로부터 패널의 타공 구조를 도출하기 위한 역설계 시스템이다. 이 시스템은 투영면에 표현하고자 하는 형상의 위치와 크기를 설정하고, 형상으로부터 광원에서의 방향벡터를 계산하여 타공 형태를 도출하는 방법이다. 이를 위한 전체 절차는 [그림 3-4]의 순서와 같다.



[그림 3-4] Reverse Design Algorithm for Perforated Panel Extraction

본 시스템 역시 ① 목표 형상 정의(입력), ② 빛의 경로 역산(처리), ③ 타공 형태 추출(출력)의 세 단계로 구성되며, 이에 대한 매개변수와 절차적 흐름은 [표 3-2]에 정리하였다.

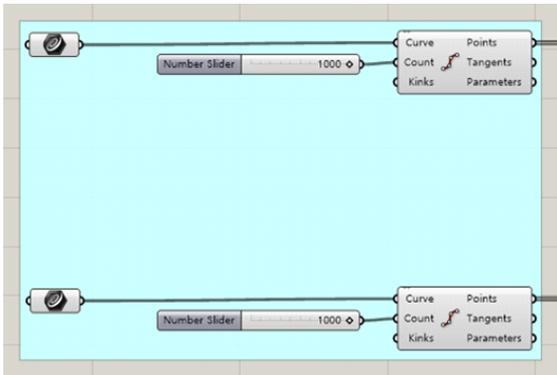
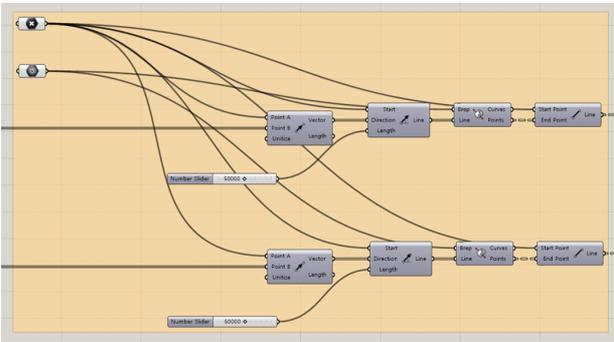
①와 ①'는 목표 형상을 정의하는 두 참조모델로, ① 단계에서는 이 목표 형상을 투영면 ③에 배치한 뒤 외곽 경계를 다수의 점으로 분할한다. 분할된 점들은 ② 단계에서 광원 방향의 벡터를 계산하기 위한 기준 좌표로 사용된다.

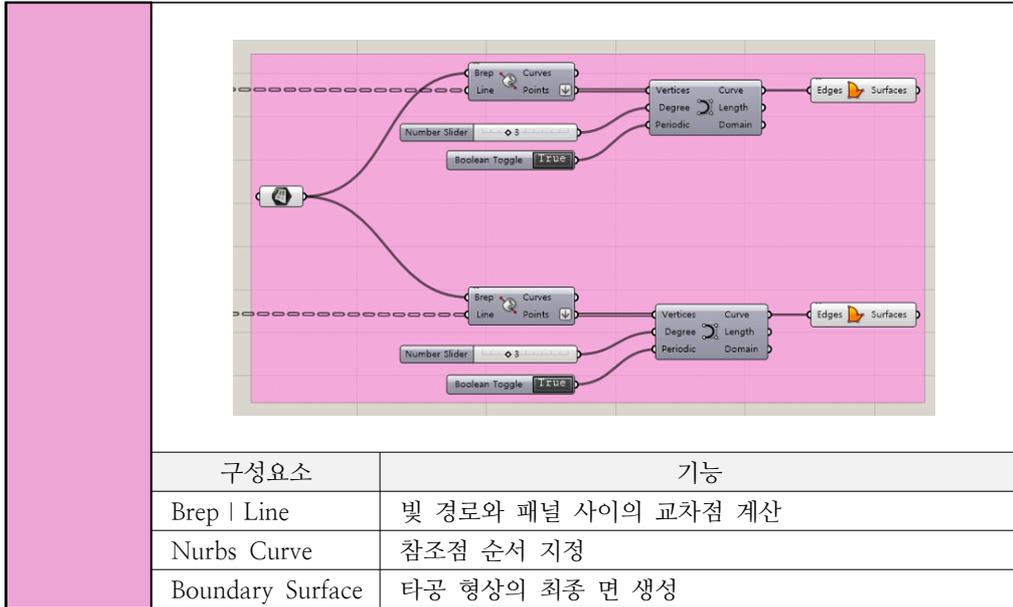
②는 광원을 나타내며, ② 단계에서는 ①에서 생성된 각 분할점으로부터 광원을 향한 경로를 벡터로 계산하여 패널과의 교차 지점을 도출한다. 이렇게 계산된 경로는 목표 형상을 재현하기 위해 패널에서 타공이 이루어져야 하는 위치를 결정하는 핵심 요소가 된다.

③ 단계에서는 이러한 교차점을 순서대로 연결하여 하나의 폐합된 면으로 구성하고, 이를 목표 형상에 대응하는 타공 형태로 재구성한다. 이후, 라이노에서 Surface를 생성하고, 타공 형태를 투영하여 최종적인 타공 패널을 도출할 수 있다.

[표 3-2] Details of reverse design algorithm for extracting perforated panels

절차 단계	세부 내용	
① 목표 형상 정의	매개변수	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 목표 형상</li> <li>• 형상의 크기 및 위치</li> <li>• 분할 수</li> <li>• 투영면의 방위 및 크기</li> </ul>

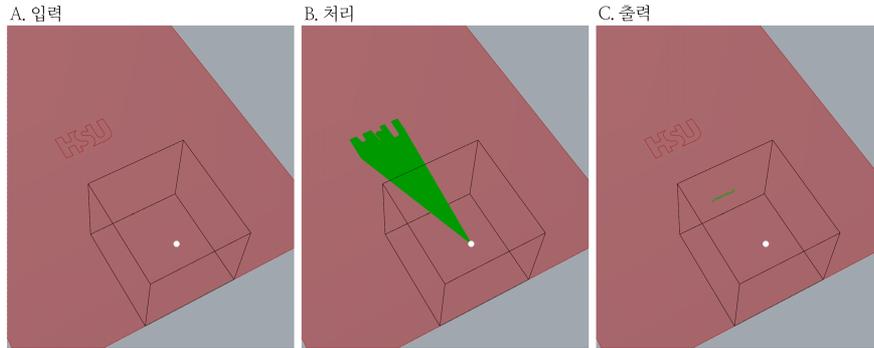
(입력)		
	구성요소	기능
	Divide Curve	곡선 분할
Number Slider	분할된 선의 점 개수 제어	
② 빛의 경로 역산 (처리)	매개변수	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 광원의 위치</li> <li>• 광원의 방향 벡터</li> </ul>
		
	구성요소	기능
	Vector 2Pt	빛의 방향 벡터 생성
	Line SDL	빛의 투사 경로 생성
Brep   Line	빛과 패널 간의 교차점 계산	
Line	광선의 실제 도달위치 시각적 표현	
③ 타공 형태 추출 (출력)	매개변수	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 패널의 위치 및 방위</li> <li>• 형상면 구성 방식</li> </ul>



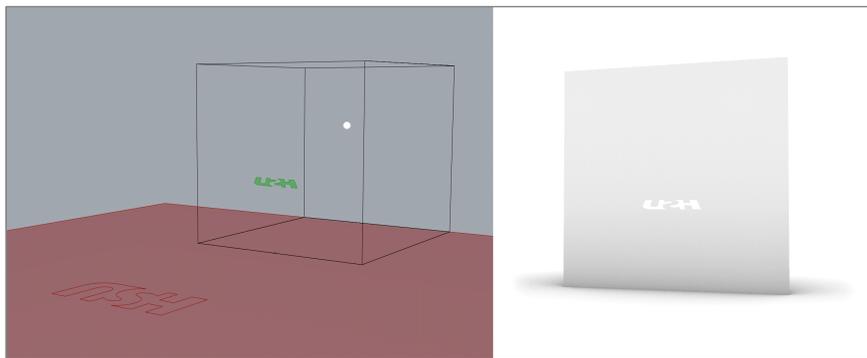
[그림 3-5]는 목표 투영 형상으로부터 패널의 타공 형태를 도출하는 역설계 알고리즘을 라이노 환경에서 시각화한 결과이다. 화면 하단의 투영면(㉔)에 배치된 두 개의 형상(㉑, ㉑')은 입력 단계에서 설정된 투영 목표 형상이다. 각 형상의 외곽선을 따라 일정 간격으로 분할한 점들로 변환되어 이후 계산 과정의 기준점으로 활용된다.

직육면체 내부의 점(㉒)은 광원의 위치를 나타내며, 처리 단계에서 각 분할점으로부터 광원까지의 방향을 기하학적으로 추적하기 위한 기준이 된다. 목표 형상을 기준으로 역방향의 빛의 진행 경로를 보여주고 있다. 이러한 경로 중 패널이 위치하는 영역과 교차하는 지점이 패널 상에서 타공이 이루어져야 할 위치가 된다.

출력 단계에서는 교차점들이 순서대로 연결되어 하나의 패널 타공 경계를 형성한다. [그림 3-6]에서 볼 수 있듯, 두 개의 목표 형상은 동일한 절차를 거쳐 각각의 교차점을 생성하며, 최종적으로 생성된 교차점의 집합은 라이노 환경에서 폐합된 면(Surface)로 구성되어 실제 제작 가능한 타공 패널로 변환 가능하다.



[그림 3-5] Digital Simulation of Reverse Design Algorithm for Perforated Panel Extraction



[그림 3-6] The shape of the extracted perforated panel

### 3.2.3 시스템 성능 검증 및 결과 분석

역설계 알고리즘을 통해 도출된 타공 형상의 유효성을 검증하기 위해, [그림 3-1]의 실험 장치에 적용하여 물리적 투영 실험을 수행하였다. [그림 3-6]의 도출된 형태를 패널에 타공 하여 장치 전면의 패널 가이드 레일에 장착하고 동일한 조건에서 광원을 조사한 결과, [그림 3-7]과 같이 디지털 시뮬레이션 환경에서 계산된 목표 형상이 실제 투영에서도 구현되는 것을 확인하였다.



[그림 3-7] Target Shape Reproduction Experiment Based on Light Source Projection Algorithm

이때, 디지털 시뮬레이션 환경에서는 광원을 점광원으로 설정할 수 있지만, 소형의 실험 장치에서는 무시해도 될 정도의 오차범위를 갖고 있다. 하지만 물리 실험에서는 광원이 점 형태로 완전히 수렴될 수 없으므로, 투영된 형상의 명료도가 디지털 시뮬레이션에 비해 다소 부족한 한계를 보였다. 이는 광원의 면적, 확산 특성, 빛의 번짐 등 물리적 요인에 의해 형상의 경계가 선명하게 형성되지 못한 결과이며, 향후 목표 형상의 정확도를 높이기 위해서는 이러한 광원의 물리적 특성에 따른 오차를 보정할 수 있는 시스템적 대응이 필요하다.

특히, 물리 환경에서는 반그림자(Penumbra)가 필연적으로 발생하므로, 반그림자 영역을 고려한 보정 시스템을 적용할 경우, 타공 패널을 통해 구현되는 투영 형상의 정확도와 선명도를 물리 환경에서 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

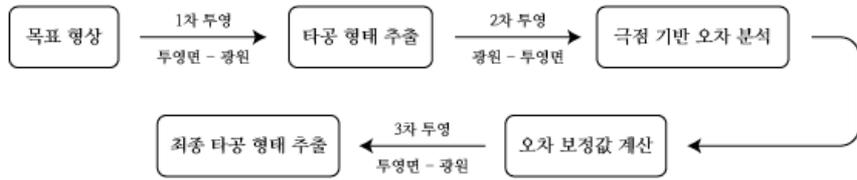
## IV. 자동화 시스템 알고리즘 구현

### 4.1 자동화 시스템 알고리즘 설계

#### 4.1.1 통합 알고리즘 구조

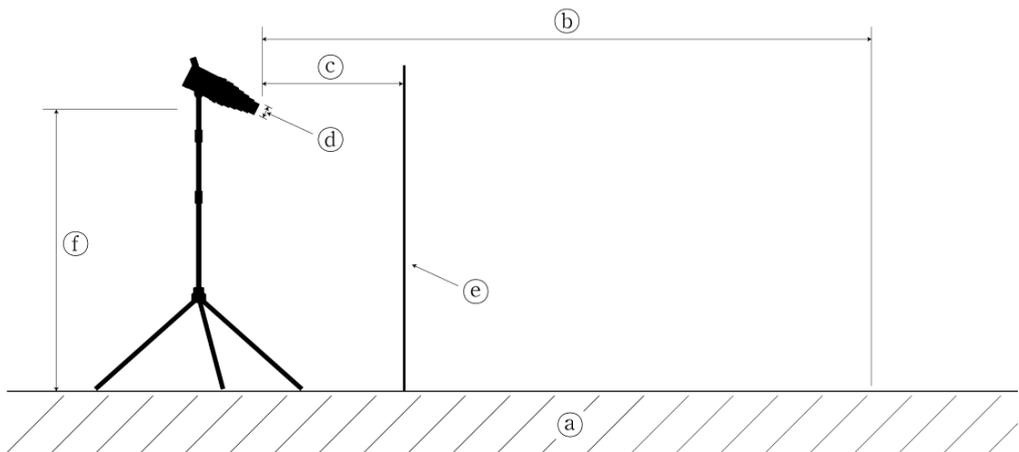
본 연구에서 구축하고자 하는 자동화 시스템은 3장에서 제시한 점광원 기반 역설계 시스템을 기반으로 하며, 실제 실험 환경에서 사용되는 면광원의 물리적 특성을 반영할 수 있도록 형상 보정 알고리즘을 추가하여 하나의 통합된 처리 흐름을 구성하는 것을 목표로 한다. 광원의 물리적 특성을 반영한 형상 보정 알고리즘을 추가하여 하나의 통합된 처리 흐름을 구성한다. 면광원을 사용할 경우, 투영 형상에서 반그림자 중첩으로 인해 형상이 넓어져 보이는 현상으로 인해 충분히 표현되지 못하기 때문에, 광원의 크기·형상·배치에 의해 발생하는 실제 오차를 연산 과정에 반영하는 구조를 설계하는 것이 핵심이다.

이 통합 구조는 목표 형상의 외곽선을 기준으로 1차 타공 패턴을 추출한 뒤, 광원에 의해 형성되는 초기 형상을 계산하는 단계에서 시작된다. 다음 단계에서는 실제 광원이 점광원이 아닌 면광원이라는 점을 고려하여, 광원의 물리적 크기에 의해 발생하는 투영 왜곡을 계량화하기 위해 네 개의 극점(상하좌우)을 설정하고, 각 극점에서의 투영 오차 형상을 도출한다. 이 과정에서 각 극점은 광원의 외곽 윤곽과 대응되며, 각 지점에서 형상이 투영될 때 발생하는 편차를 분석함으로써 광원의 크기로 인해 생기는 형상 오차를 추정하게 된다. 이후 도출된 오차 형상들의 경계값을 비교하여 오차 범위를 파악하고, 이를 기준으로 재역산 과정을 수행하여 최종적으로 보정된 타공 형태를 추출한다. 상기 과정에 대한 개략적인 절차를 도식화하면 [그림 4-1]과 같다.



[그림 4-1] Flowchart of Light Source Projection and Shape Correction Algorithms

상기 알고리즘 구조를 검증하기 위한 물리적 실험 조건은 [그림 4-2]와 같다. ㉑는 실험이 이루어질 투영면이며, ㉒는 광원의 시작점으로부터 바닥면에 도달하는 빛의 중심점을 의미한다. ㉓는 광원과 투영 패널(㉑) 사이의 직선거리이다. ㉔는 광원의 실제 너비를 의미하며, 본 연구에서는 원형의 면광원을 사용했다. 마지막으로 ㉕는 바닥면으로부터 광원의 시작점까지의 높이를 뜻한다. 이러한 물리적 배치는 면광원의 실제 투영 조건을 재현하기 위한 기본 환경을 구성하며, 이후 알고리즘 설계 과정에서 오차 분석의 기준 좌표 역할을 한다.



[그림 4-2] Schematic Representation of A Physical Experiment

종합하면, 본 절에서 제시된 통합 알고리즘 구조는 점광원 기반 역설계 시스템을 출발점으로 하되, 실제 면광원의 물리 조건을 반영할 수 있도록 오차 형상 분석 절차를 포함하는 형태로 설계되었다. 이를 통해 단순한 이상적 투영 모델이 아닌, 현실적인 조도, 광원의 크기, 거리 조건 아래에서 동작 가능한 자동화된 타공 설계 시스템을 구축할 수 있는 체계를 마련하였다.

#### 4.1.2 통합 알고리즘 매개변수 설정

통합 알고리즘 구조를 실제 계산 절차로 전환하기 위해서는, 형상 생성 과정에 영향을 미치는 주요 매개변수들을 정의하고 그 역할을 체계적으로 설정하는 단계가 필요하다. 본 연구에서 제안하는 알고리즘은 광원과 패널의 배치, 목표 형상의 공간적 확보, 극점 기반의 오차 분석을 포함하여 일련의 연산 흐름을 구성하므로, 각 단계에서 참조되는 매개변수들의 명확한 정의는 알고리즘의 안정성과 자동화를 확보하기 위한 필수 조건이다. 단, 본 단계에서 설정된 매개변수는 알고리즘 구축을 위한 초기 조건으로, 보정 시스템에서는 필요에 따라 선택적으로 적용된다.

##### (1) 공간 배치 매개변수

광원·패널·바닥면의 상대 위치를 규정하는 기본요소로 사용된다. 광원의 시작점( $P_L$ )은 전체 연산의 기준 좌표계가 되며, 광원과 투영면 사이의 거리( $L_R$ ), 광원과 패널 사이의 거리( $L_P$ ), 바닥면과 광원 중심점 간의 높이( $h_L$ )가 포함된다. 이 변수들은 광원이 투사하는 경로의 방향과 범위를 결정하며, 이후 극점 기반 오차 분석 시 원점 좌표로 사용된다. 본 연구에서 사용된 면광원의 물리적 크기 또한 중요한 매개변수로, 이는 반그림자 영역의 크기와 형상 겹침의 범위를 결정하는 요소로 작용한다. 광원의 직경( $r_L$ )은 개별 극점의 위치 산출과 오차 형상의 초기 경계값을 계산하는 기준으로 사용된다.

## (2) 목표 형상 및 1차 타공 패턴 매개변수

알고리즘의 초기 입력값으로, 목표 형상의 중심점( $C$ ), 너비( $s_{T,w}$ ), 높이( $s_{T,h}$ ), 외곽선 분할 밀도( $R_T$ )가 포함되며, 이러한 값들은 초기 타공 패턴 산출 시 필수적으로 참조된다. 또한, 타공 패널의 유효면적, 패널의 실제 너비·높이, 패널 좌표계 중심점 등의 변수는 타공점의 위치 조정과 오차 보정 과정에서 기준 좌표로 사용된다.

## (3) 극점 기반 오차 분석 매개변수

면광원의 외곽을 구성하는 네 개의 극점 위치( $P_T, P_B, P_L, P_R$ )와 이들로 부터 계산되는 오차 경계값을 의미한다. 각 극점은 광원의 실제 지름과 중심점 좌표를 기반으로 결정되며, 목표 형상과의 비교를 통해 구역별 오차 크기( $E_T, E_B, E_L, E_R$ )가 산출된다. 이 단계에서 설정되는 매개변수는 보정 알고리즘의 적용 범위와 연산 방향을 정의하는 핵심 요소로 작용한다.

## (4) 연산 과정 제어 매개변수

오차 보정량을 결정하는 가중치 계수( $k$ ), 보정 반복 횟수( $N$ ), 오차 수렴 기준값( $\gamma$ ) 등을 포함한다. 이 매개변수들은 알고리즘이 자동화된 방식으로 수렴하는데 필요한 연산적 설정 요소이며, 보정 강도와 반복 과정의 안정성을 조절하는 역할을 한다.

상기 정의된 매개변수들은 통합 알고리즘의 개별 단계에서 참조 또는 연동되며, 이후 제시될 구현 과정에서 실제 데이터 흐름으로 연결된다.

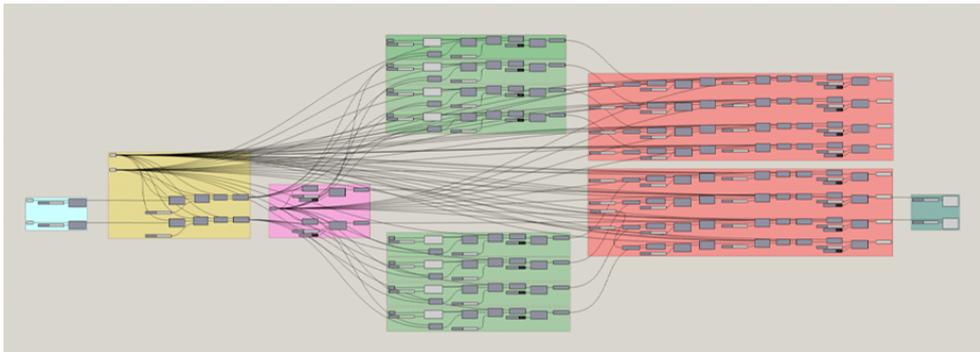


[그림 4-3] Integrated Algorithm Parameters

## 4.2 자동화 시스템 구현

### 4.2.1 통합 알고리즘 디지털 구성

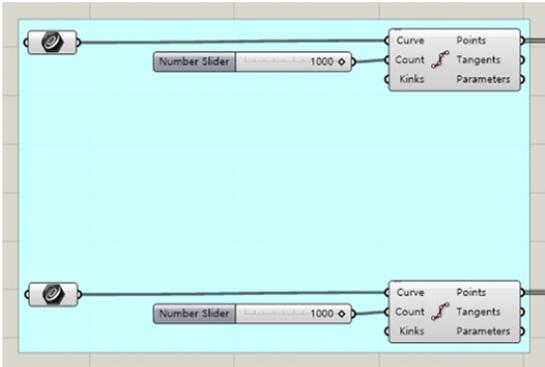
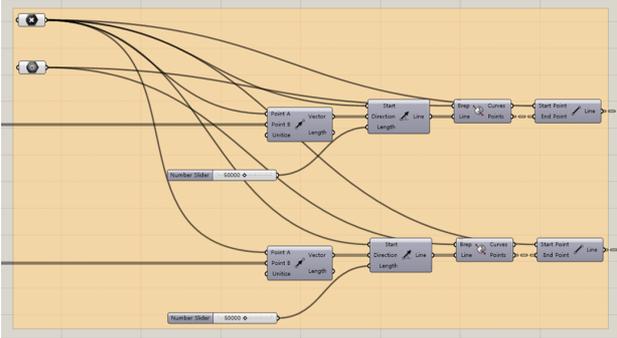
본 절에서는 목표 형상의 투영 및 타공 형태 보정 과정을 자동화하기 위해 그래프호퍼 기반의 통합 알고리즘을 디지털로 구성하는 과정을 서술하고자 한다. 알고리즘은 입력된 기하 정보(목표 형상)를 분해하고, 광원-패널-투영면 사이의 기하학적 관계를 실시간으로 연산하며, 최종적으로 [그림 4-4]와 같이 패널에서 요구되는 타공의 위치 및 형태를 산출하는 구조로 설계되었다.



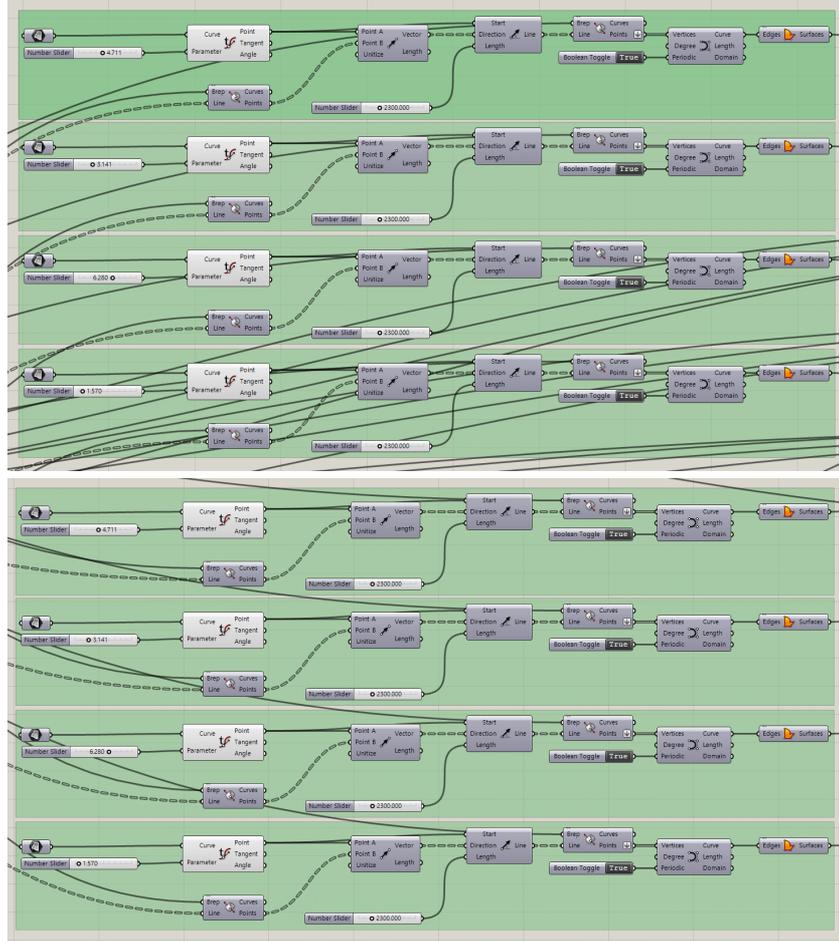
[그림 4-4] Light Source Projection and Shape Correction Algorithms

전체 구성은 ① 목표 형상 정의, ② 빛의 경로 역산, ③ 타공 형태 추출, ④ 극점 설정 및 2차 투영, ⑤ 보정량 계산, ⑥ 보정량 적용의 다섯 단계의 모듈로 나누어 구현하였으며, 이에 대한 설계 과정은 [표 4-1]에서 자세히 설명한다.

[표 4-1] Details of the Light Source Projection and Shape Correction Algorithm

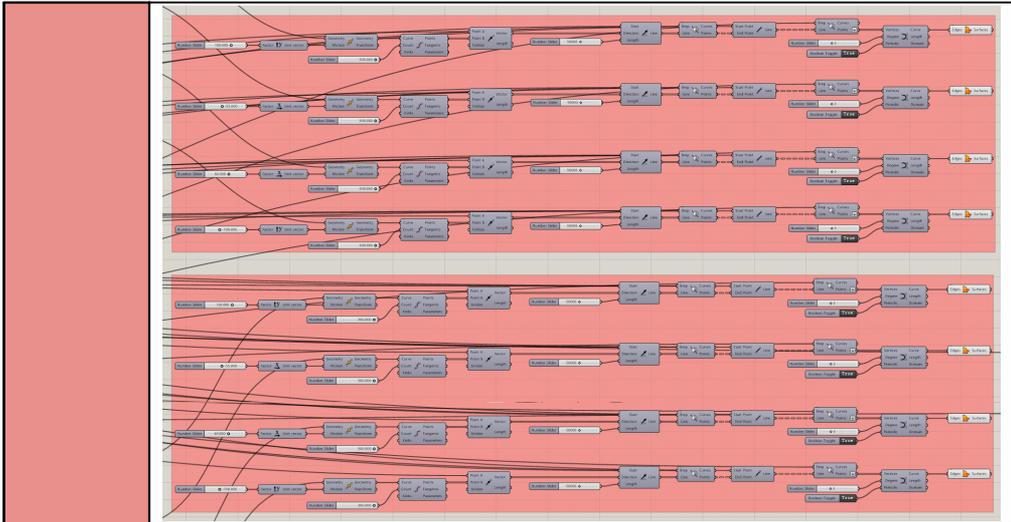
절차 단계	세부 내용	
① 목표 형상 정의 (입력)	매개변수	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 목표 형상</li> <li>• 형상의 크기 및 위치</li> <li>• 분할 수</li> <li>• 투영면의 방위 및 크기</li> </ul>
		
	구성요소	기능
	Divide Curve	곡선 분할
Number Slider	분할된 선의 점 개수 제어	
② 빛의 경로 역산 (처리)	매개변수	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 광원의 위치</li> <li>• 광원의 방향 벡터</li> </ul>
		

	구성요소	기능
	Vector 2Pt	빛의 방향 벡터 생성
	Line SDL	빛의 투사 경로 생성
	Brep   Line	빛과 패널 간의 교차점 계산
	Line	광선의 실제 도달위치 시각적 표현
③ 타공 형태 추출 (출력)	매개변수	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 패널의 위치 및 방위</li> <li>• 형상면 구성 방식</li> </ul>
	구성요소	기능
Brep   Line	빛 경로와 패널 사이의 교차점 계산	
Nurbs Curve	참조점 순서 지정	
Boundary Surface	타공 형태의 최종 면 생성	
④ 극점설정 및 2차투영 (2차 입력)	매개변수	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 광원 극점(상/하/좌/우)</li> <li>• 광원의 방향 벡터</li> </ul>



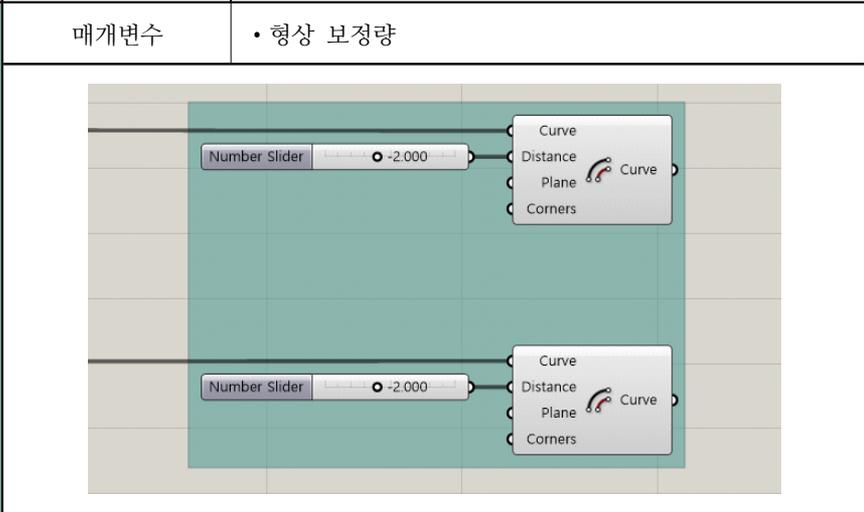
구성요소	기능
Evaluate Curve	광원 극점 추출
Vector 2Pt	빛의 방향 벡터 생성
Line SDL	빛의 투사 경로 생성
Brep   Line	빛과 패널 간의 교차점 계산
Line	광선의 실제 도달위치 시각적 표현
Boundary Surface	타공 형상의 최종 면 생성

⑤ 보정량 계산 (2차 처리)	매개변수	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 형상 이동방향</li> <li>• 보정 후 재투영 결과</li> </ul>



구성요소	기능
Move	광원 극점 추출
Divide Curve	곡선 분할
Vector 2Pt	빛의 방향 벡터 생성
Line SDL	빛의 투사 경로 생성
Brep   Line	빛과 투영면 간의 교차점 계산
Line	광선의 실제 도달위치 시각적 표현
Brep   Line	빛과 패널 간의 교차점 계산
Nurbs Curve	참조점 순서 지정
Boundary Surface	타공 형상의 최종 면 생성

⑤  
보정량  
적용  
(2차 출력)

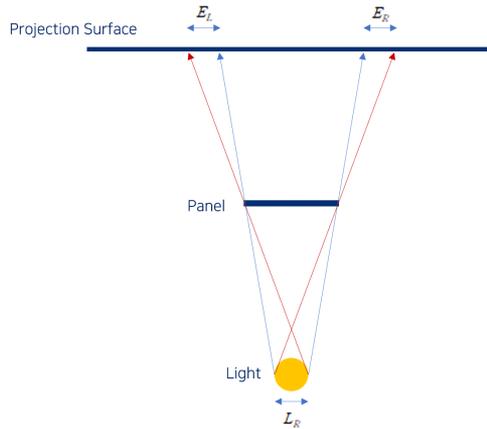


구성요소	기능
Number Slider	보정값 조절
Offset Curve	보정 방법 설정

## 4.2.2 통합 알고리즘 보정 및 검증 실험

4.2.1절에서는 투영 과정에서 발생하는 투영 형상의 오차를 정량적으로 평가하기 위해 네 개의 극점(상·하·좌·우)을 기준으로 목표 형상과 목표 형상 간의 거리를 측정하였으며, 이를 기반으로 단일 보정량을 설정하는 계산 구조를 설계하였다. 본 절에서는 해당 보정량을 실제 패널 제작 스케일로 환산하여 보정계수를 도출하는 과정과 검증 실험 과정을 상세히 기술한다.

### (1) 극점별 오차값 정의 및 과정



[그림 4-5] Defining Pole-specific Error Values

목표 형상의 중심점( $c$ )을 기준으로 정렬하여, 극점에서 1차 타공 패널을 지나 투영된 형상의 거리 차이를 수식(1)과 같이 정의하였다.

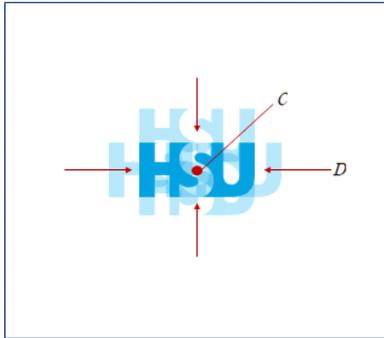
$$E_q = R_{p,q} - R_{t,q} \quad , \quad (q \in T, B, L, R) \quad (1)$$

이때,  $R_{p,q}$ 는 극점 기반 투영 형상의 방향별 끝점이며,  $R_{t,q}$ 는 목표 형상의 네 방향 끝점을 의미한다. 극점까지의 거리를 의미한다. 또,  $E_q$ 는 해당 방향에서 나타난 오차 형상 편차를 의미하는데, 실제 측정값은 다음과 같다.

$$E_T = 141.79 / E_B = 85.48 / E_L = 72.00 / E_R = 63.07 \text{ (mm)}$$

위 오차값은 [그림 4-5]와 같이 광원면의 크기(지름 57mm)로 인한 반그림자의 오차이다.

(2) 보정량(보정계수) 도출 및 과정



[그림 4-6] Projection Surface

오차 보정을 위해 타공 형상을 형상중심( $c$ ) 방향으로 보정할 때, 모든 방향에서 동일한 보정량  $D$ 를 적용한다고 가정하면, 보정 후 잔여 오차는  $E'_q$ 로 정의할 수 있으며, 도출 방법은 수식(2)와 같다. 이때, 가장 이상적인 보정량 ( $D$ )은 네 방향 잔여 오차의 제곱합을 최소로 하는 값이다. 다음으로, 평균 극점 오차 도출을 위한 목적함수를  $F(D)$ 라 설정하면 수식(3)을 얻을 수 있다.

$$E'_q = E_q - D \tag{2}$$

$$F(D) = (E_T - D)^2 + (E_B - D)^2 + (E_L - D)^2 + (E_R - D)^2 \tag{3}$$

수식(3)을 전개하면 수식(4)와 같다.

$$\begin{aligned}
F(D) &= (E_T - D)^2 + (E_B - D)^2 + (E_L - D)^2 + (E_R - D)^2 \\
&= (E_T^2 - 2E_T D + D^2) + \dots + (E_R^2 - 2E_R D + D^2) \\
&= (E_T^2 + E_B^2 + E_L^2 + E_R^2) - 2D^2(E_T + E_B + E_L + E_R) + 4D^2
\end{aligned} \tag{4}$$

이를 미분하여 최소값 조건을 적용하면 수식(5)를 얻을 수 있으며, 최소값의 조건은  $\frac{dF}{dD} \approx 0$ 이므로,  $-2(E_T + E_B + E_L + E_R) + 8D = 0$ 이다.

$$\frac{dF}{dD} = -2(E_T + E_B + E_L + E_R) + 8D \tag{5}$$

따라서 수식(5)를 정리하면, 수식(6)과 같다.

$$\begin{aligned}
8D &= 2(E_T + E_B + E_L + E_R) \\
D &= \frac{(E_T + E_B + E_L + E_R)}{4}
\end{aligned} \tag{6}$$

이는 네 극점 오차의 평균값을 보정량(보정계수)로 설정할 수 있다는 것을 의미하기 때문에, 실제 오차 값을 대입하여 단일 보정계수  $D$ 를 도출하기 위한 수식(7)과 같이 표현할 수 있으며, 계산하면 수식(8)과 같다.

$$E_T + E_B + E_L + E_R = 141.79 + 85.48 + 72.00 + 63.07 = 362.34 \tag{7}$$

$$D = \frac{362.34}{4}, D = 90.585mm \tag{8}$$

이는 투영면 상에서 극점 평균 90.585mm만큼의 오차가 발생했다는 것을 의미하며, 이를 수식(2)에 적용하여 잔여 오차를 계산하면 수식(9)와 같다.

$$\begin{aligned}
E_T &= 141.79 - 90.585 = +51.205mm \\
E_B &= 85.48 - 90.585 = -5.105mm \\
E_L &= 72.00 - 90.585 = -18.585mm \\
E_R &= 63.07 - 90.585 = -27.515mm
\end{aligned} \tag{9}$$

수식(9)에서 도출된 값을 모두 더하면 각 방향의 잔여 오차는 0에 수렴한다. 이는 전체적으로 균형이 잡힐 수 있는 수치라고 해석할 수 있으므로, 형상의 중심 방향으로 균등하게 축소하는 것이 이상적이라는 것으로 해석할 수 있다.

### (3) 계산적 스케일 변환 및 과정

투영면과 패널의 스케일 환산을 위해 비례식을 사용하면 수식(10)과 같다. 이때, 투영면-광원 간 거리는 약 2000mm( $L_R$ )이며, 패널의 형상 높이는 약 60mm( $L_P$ ), 스케일 비례 계수는  $k'$ 으로 설정하고 이를 보정량 환산식으로 치환하면 수식(11)과 같이 표현 가능하다.

$$k' = \frac{L_P}{L_R} \quad (10)$$

$$S = k \cdot D \quad (11)$$

수식(11)에 수식(8)에서 도출한 단일 보정 계수  $D$ 를 대입하면, 수식(12)와 같이 풀이할 수 있다.

$$\begin{aligned} S &= 0.03 \times 90.585 \\ &= 2.71755 \text{ mm} \end{aligned} \quad (12)$$

즉, 이론적으로는 타공 외곽선을 형상의 중심 방향으로 약 2.7mm 내외로 단일 보정량을 적용할 경우, 목표 형상에 가까운 투영 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 보정은 그래스호퍼의 오프셋 기능을 통해 구현이 가능하므로, 이에 기반한 보정 실험을 다음 단계에서 수행하였다.

#### (4) 보정량 검증 실험 및 과정

앞선 과정을 통해 도출된 이론적 보정량 즉, 이론값은 약 2.7mm로 산출되었으나, 이는 투영 스케일을 기반으로 한 근사적 계산이며 실제 제작 공정 및 측정 환경에서는 소수점 이하 보정량을 직접적으로 적용하는 것이 현실적으로 적합하지 않다. 소수점 단위의 편차는 패널 가공 과정에서 통상적으로 발생할 수 있는 수준의 제작 오차 범위에 속하며, 설치 과정에서도 패널 고정 상태나 광원 위치의 미세한 변동 등 다양한 외부 요인으로 인해 상쇄되거나 변동될 수 있다. 이에 따라 이론값 자체를 그대로 적용하기보다는, 이론값을 중심으로 정수 단위 보정량을 단계적으로 검증하여 최적의 보정값을 도출하는 것이 실환경에서는 합리적인 접근이라 판단했다.

검증 실험에서 사용된 광원은 실사용 환경에서 보편적으로 활용되는 수준의 밝기와 전력 소비량을 가진 제품으로 선정하였다. 이는 물리 환경에서 사용되는 장비의 사양과 동일한 범주를 기준으로 삼아, 연구에서 제안한 알고리즘이 특정 단일 조건에서만 작동하는 것이 아니라, 실제로 통용되는 조명 사양의 범위 내에서는 동일한 원리로 적용될 수 있음을 확인하기 위함이다. 반대로 지나치게 높은 광량을 가진 특수 목적의 조명은 밝기 특성뿐 아니라 조달 및 설치 비용이 비례 증가하며, 이는 본 연구의 목적인 ‘현장에서 실질적으로 적용 가능한 시스템 제안’에서 벗어나게 된다. 따라서 실제 사용 환경과 기술적·경제적 조건을 모두 충족하는 수준의 광원을 선정함으로써, 통합 알고리즘이 실제 제작 및 설치 단계에서도 그대로 활용될 수 있는 재현성과 현실성을 확보할 수 있다.

또한, 광원의 발광면적은 형상 재현도에 직접적인 영향을 미치는 요인으로, 면적이 과도하게 큰 경우 반그림자 폭이 비선형적으로 증가하여 경계 변위가 확대되기 때문에, 일정 면적 이상의 광원 조건에 대해 실험 대상으로 포함하지 않았다. 다만 이는 특정한 광원을 사용해야 한다는 의미는 아니며, 발광면적이 제한된 LED 기반 광원이라면, 밝기와 전력 수준과 관계없이 일정 범위 내에서 동일한 투영 특성과 변위 경향을 보이므로, 현재의 보정 알고리즘을 적용할 수 있다. 즉, 본 연구는 절대적 단일 조건이 아닌, 현실적 조명

사양의 허용 범위 전체를 적용 가능 범주로 설정할 수 있다.

아울러, 면광원의 발광면적과 투영 경계 변위 간의 상관성은 기초 과학 이론에서 일반화된 원리로, 광원의 발광면적과 광원-패널간의 거리의 비가 증가할수록 반그림자 폭과 경계 흐림이 비례적으로 확대된다는 점은 추가적인 실험을 통해 확인해야 하는 불확실성이 아니라, 사고실험(Thought Experiment)을 통해서도 충분히 도출 가능한 기초적 결론이며, 본 연구의 실측 결과 역시 이론적 경향성과 일치한다.

이에 따라 이론값을 중심값으로 설정하고, 이를 -1mm, -2mm, -3mm 세 단계로 각 보정량 변화에 따른 투영 형상의 변화를 정량적으로 비교 분석하는 방식으로 진행하였다. 이때, 비례 안정성, 국부 표현 정확성, 종합 재현도 세 가지의 기준으로 분석 및 평가하였다. 실험은 [그림 4-2]의 구성을 기본으로, 실험의 조건은 [표 4-2]와 같다.

[표 4-2] Physical Experimental Conditions

변수	치수(단위:mm)
ⓑ	2,000
ⓒ	500
ⓓ	157
ⓕ	1,130

실험 결과, 보정량 단계에 따라 세 평가 기준은 서로 다른 양상을 보였으며, 특히 형상의 비례 안정성과 국부 표현 정확성은 상호 반비례하는 경향을 나타냈다. 보정량 -1mm에서는 전체 형상의 비례안정성이 가장 높게 유지되었는데, 이는 외곽선의 수축량이 상대적으로 적어 목표 형상의 전체 구조와 유사한 비례를 유지했기 때문이다. 그러나 동일 조건에서 획 두께나 내부 공간과 같은 국부 구조는 다소 퍼지거나 경계가 흐려지는 경향을 보여, 국부 표현 정확성 측면에서는 낮은 평가를 받았다.

반면, 보정량 -3mm에서는 외곽선의 수축이 크게 적용되면서 내부 공간과 획 구조가 상대적으로 선명하게 표현되어 국부 구조의 재현도는 높은 결과를 보였다. 그러나 과도한 수축으로 인해 전체적인 외곽 비례 표현에 있어 직사각형이 아닌 사다리꼴의 형태로 목표 형상과 다소 차이를 보였고, 형상의 안정성이 저하되는 문제가 관찰되었다.

이러한 상반된 특징 속에서 보정량 -2mm는 두 속성 간의 균형을 가장 안정적으로 유지했다고 판단된다. 전체 비례가 과도하게 변형되지 않으면서도, -3mm에서 관찰된 국부 표현의 선명도 역시 일정 수준 확보하여, 형상 전체의 조형적 완성도가 가장 높게 나타났다. 그렇기 때문에 종합 재현도 평가에서도 보정량 -2mm가 가장 우수한 것으로 확인되었다.

[표 4-3] Physical Experiment Results

보정량	타공 패널	투영 형상
1차 타공 패널		
-1mm		
-2mm		
-3mm		

### 4.2.3 통합 알고리즘 결과 종합

상기 과정을 통해 도출된 보정량은 광원의 세기 등 광학적 특성에 따라 일정 부분 변동될 수 있다. 일반적으로 광원의 밝기가 증가할수록 반그림자 영역은 축소되며, 태양광과 같은 초고광량 환경에서는 반그림자가 거의 관찰되지 않기 때문에 보정의 필요성이 감소한다. 그러나 물리 환경에서 사용되는 조명은 무한한 에너지나 이상적인 점광원 조건을 형성하지 않으며, 발광면적에 따른 확산과 감쇠가 존재하여 투영 형상이 유지될 수 있는 현실적 투자 거리 및 해상도에도 제한이 있다. 이러한 조건을 고려할 때, 본 연구에서는 -2mm의 보정량이 디지털 시뮬레이션 및 실측 결과 모두에서 가장 높은 재현도를 확보하는 값으로 확인되었다.

본 연구가 광원의 세기나 개별 사양에 따라 보정값을 세분화하여 제시하지 않은 이유는, 연구의 목적이 특정 광원 모델에 대한 절대적 보정값을 규정하는 데 있는 것이 아니라, 실제 환경에서 적용 가능한 보정 알고리즘의 구조적 절차를 확립하는 데 있기 때문이다. 물리 환경에서 활용되는 대부분의 조명은 경제성과 접근성이 확보된 범용 LED 기반 장비이며, 이러한 조명은 발광면적이 제한된 준점광원 구조를 이루기 때문에 일정 범위 내에서 유사한 투영 특성과 변위 경향을 보인다. 따라서 본 연구는 현실적 조명 사양의 허용 범위를 기준으로 실험을 설계하였으며, 동일한 절차를 통해 보정량을 산출할 수 있는 알고리즘적 기반을 마련하는 데 중점을 두었다. 아울러 본 연구에서 제안한 보정 알고리즘은 개별 수치에 대한 절대값 제시보다, 다양한 환경에서 형상 오차를 정량적으로 측정하고 최적 보정량을 도출할 수 있는 절차적·구조적 체계를 구축하였다는 점에서 의의를 갖는다.

결과적으로, 본 연구의 통합 알고리즘은 디지털 시뮬레이션과 물리 실험 간의 일관된 경향성을 기반으로 형상 재현도를 향상시키는 실질적 설계 도구로 기능할 수 있으며, 설치 환경, 광원 조건 및 투자 거리 등의 변화에도 동일한 절차로 보정값을 산출할 수 있는 확장성을 갖추고 있다. 이는 실제 제작 및 설치 과정에서 발생하는 다양한 변동 요인을 고려하더라도 안정적인 투자 형상 재현성을 확보할 수 있는 체계적 방식임을 보여준다.

## V. 결론

본 연구는 기존의 물리 환경에서 수기 계산식에 의해 수행되었던 빛의 투영 실험을 디지털 시뮬레이션 환경에서 자동화할 수 있는 알고리즘 구축하는 것을 목표로 출발하였다. 선행된 물리적 방식은 형상 생성 과정이 정량적 계산을 기반으로 이루어졌다는 점에서 반복 실험을 축소할 수 있는 장점이 있었으나, 조건의 변화에 따른 실험 및 계산을 수행해야만 결과를 확인할 수 있다는 한계를 가지고 있었다. 더불어 실제 조명 환경에서는 반그림자, 광량 확산, 광원 면적에 따른 형상 왜곡과 중첩이 필연적으로 발생함에도, 선행연구는 주로 이상적 점광원을 가정하여 이러한 조형적 변화를 체계적으로 분석하지 못했다. 이에 본 연구는 라이노와 그래스호퍼 기반의 컴퓨테이셔널 설계 환경을 활용하여, 빛의 투영 메커니즘을 정량적으로 분석하고 보정할 수 있는 디지털-물리 통합 자동화 설계 프로세스를 마련하고자 하였다.

실제 조명 환경에서 면광원의 물리적 특성은 목표 형상의 명료도를 저하시킨다. 이러한 현실적 조건을 반영하기 위해, 광원을 중심으로 한 네 개의 극점을 기준으로 형상 변위를 측정하여 오차량을 산출하고, 이를 반영한 보정량을 도출하는 알고리즘을 제안하였다. 이 과정은 단순히 형상을 보정하는 절차를 넘어, 목표 형상의 구조적 안정성을 유지한 채 형상을 재현할 수 있는 실질적 설계 기반을 마련한다는 점에서 의의를 갖는다.

또한, 그래스호퍼 알고리즘 시스템을 활용함으로써, 투영 형상의 변화를 설계 과정에서 즉각적으로 확인 가능하였으며, 광원의 위치·거리·크기와 같은 변수가 목표 형상의 재현성에 미치는 영향을 실시간으로 검토할 수 있었다. 이는 직관적 실험 기반 설계와 달리, 변수를 조절하여 다수의 대안을 반복적으로 생성하고 비교할 수 있는 자동화 시스템을 구축했다는 점에서 설계 효율성과 논리성을 동시에 확보할 수 있었다. 이러한 일련의 과정은 물리적 조형 실험과 디지털 설계가 분리되어 있던 선행연구와 달리, 양자를 유기적으로 통합하는 설계 방법론의 가능성을 보여준다.

향후 연구에서는 본 연구가 다루지 못한 투영면의 재질, 실내·실외 조건 등 다양한 현실적 변수를 반영한 심층적 실험이 필요하다. 이러한 후속 연구

가 이루어진다면, 본 연구에서 제안한 자동화 시스템은 단순한 형상 생성 절차를 넘어 실제 공간과 목적에 따라 활용 가능한 실질적 조명 시스템으로 확장될 수 있다. 이를 확인하기 위해 본 연구에서는 세 가지 적용 시나리오를 시뮬레이션 형태로 제안한다.

### (1) CPTED 조명 설계

보도 환경의 안정성 향상을 위한 투영 조명 설계의 적용이다. 패널의 미세 타공을 통해 경고 문구나 안내 메시지를 투영함으로써 보행자의 시각적 인지성을 높일 수 있으며, 물리 환경에서의 [그림 5-1]과 같이 특정 문구를 직관적으로 전달하여 보행공간의 안정감 증진을 기대할 수 있다.



[그림 5-1] Utilization of CPTED Aspects

### (2) 건축 라이트 사이니지 설계

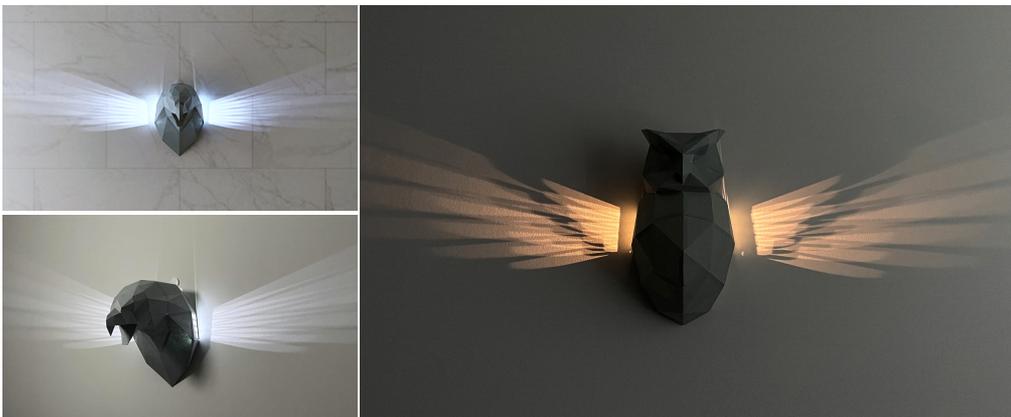
[그림 5-2]와 같이 건물 및 건축 외피에 적용하여 경관 조명 또는 아이덴티티 구축 요소로 활용할 수 있다. 이는 고정형 간판 대비 구조물의 노출 면적이 적어 강풍, 비, 기온 변화와 같은 외부 환경 요인에 의한 손상이 적고, 이에 따라 전반적인 유지보수 비용이 낮다는 장점을 가진다.



[그림 5-2] Utilization of Signage Aspects

### (3) 라이트 아트 및 제품 설계

조형 오브제 기반의 라이트 아트와 결합함으로써 예술적 표현을 확장하는 새로운 응용 사례로 발전할 수 있다. 새의 얼굴과 몸통 형태의 오브제에 투영 패널 구조를 응용함으로써, 기존 조명 방식과 차별화된 조형적 경험을 제공할 수 있다.



[그림 5-3] Utilize Product Design Aspects

결론적으로 본 연구는 빛의 투영 형상 생성 알고리즘을 적용하여 조형적 표현과 물리 환경 변수를 통합적으로 고려하는 새로운 자동화 설계 방법론을 제안하였으며, 이를 활용하여 향후 다양한 예술·디자인·공공환경 분야에 적용 가능한 기반 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

# 참 고 문 헌

## 1. 국내문헌

- 강정식, 김충식. (2018). 활동성 강화를 통한 범죄예방환경설계(CPTED) 적용방안 연구. 『한국조경학회』, 추계 국제학술대회 논문집
- 권달우. (2018). 『안동 법흥지하차도에 빛터널 조성』. 안동: adinews.
- 김수한, 전신종. (2024). 빛의 물리적 특성을 활용한 시각적 표현에 대한 연구 - 실험제작을 중심으로. 『기초조형학연구』, 25(5)
- 김수한, 전신종. (2025). 빛의 물리적 특성을 활용한 시각적 표현에 대한 연구 2 - 디지털 시뮬레이션 자동화 시스템 구현을 중심으로. 『기초조형학연구』, 추계 국제학술대회 논문집
- 김영철. (2019). 인식 원리로서의 빛 -안셀무스와 보나벤투라를 중심으로-. 『동국대학교 동서사상연구소』, 30
- 김진수, 홍경희. (2010). 빛을 활용한 조형표현에 관한 고찰. 『한국공예논총』, 13(3)
- 나성진. (2021). 대학 내 조경전공 교육과정에 있어 새로운 컴퓨터 미디어 수업의 필요와 개선방안. 『한국조경학회지』, 49(1)
- 박기태, 이진호. (2017). 평면조형에서 빛의 수용과 표현에 관한 연구. 『기초조형학연구』, 18(3)
- 박세진. (2019). “비버챌린지 문제학습을 통한추상화 및 알고리즘적 사고연구”. 아주대학교 교육대학원 석사학위논문.
- 박진희, 김재범, 김종덕. (2010). 상호작용 관점에서 본 미디어 파사드에 대한 연구 -LED를 이용한 미디어 파사드의 사례를 중심으로-. 『디자인학연구』, 23(4)
- 변혁, 신규빈. (2012). 빛을 이용한 공간 표현에 대한 연구 : ‘파블로 발부에나’

- 의 <증강된 조각 시리즈>를 중심으로. 『기초조형학연구』, 13(3)
- 심승연. (2006). “도시경관조명계획에 있어서 빛이벤트 기획 및 활용방안에 관한 연구”. 건국대학교 대학원 석사학위논문.
- 이남주. (2022). 『컴퓨터이셔널 디자인』. 서울: BOOKK
- 이승지, 박현찬. (2016). 서울시 미디어 파사드 설치현황과 관리방향 설정 연구. 『서울도시연구』, 17(2)
- 장예, 남경숙. (2012). 건축 파사드의 디지털조명이 구현된 감성적 표현에 관한 연구. 『한국 생활과학연구』, 32(1)
- 전소현. (2023). “Grasshopper를 활용한 파라메트릭 포장 패턴 설계 기법 개발”. 서울대학교 환경대학원 석사학위논문
- 조나리. (2014). 『도시 디자인으로 범죄율 낮춘다』. 부산: CIVIC news.
- 천장환, Zack Soflin. 빅데이터 컴퓨테이션을 활용한 건축 디자인 프로세스에 관한 연구. 『디자인융복합학회』, 15(6)
- 한국디자인학회. (2015). 『기초 디자인 교과서』. 서울: 안그래픽스
- 한국셉테드학회. (2021). 『CPTED 고시 및 기준』. 서울: 한국셉테드학회.
- 한국셉테드학회. (2021). 『CPTED 개념 및 실천원리』. 서울: 한국셉테드학회.
- Bruce Watson. (2008). 『빛』. 경기: 삼천리
- Leon Battista Alberti. (1998), 『알베르티의 회화론』. 경기: 사계절

## 2. 국외문헌

- Appmaster. (2023). Understanding the Differences: Zero-code, Low-Code, and Traditional Coding. Philadelphia: Appmaster.
- Christina Petridou. (2024). A Glimpse into TeamLab's Dazzling Installations at Borderless Museum in Tokyo's Azabudai Hills. Milano: Designboom.
- Nina Azzarello. (2021). anila quayyum agha on how life experience led to an impassioned artistic exploration of light. Milano: Designboom.
- Refikanadol. (2024). Biography. Los Angeles: Refikanadol.
- Refikanadol. (2020). Machine Hallucination. Los Angeles: Refikanadol.
- Rhinoceros. (2025). Rhino in Architecture, Engineering and Construction. Seattle: Robert McNeel & Associates.
- Rhinoceros. (2019). Rhino Features. Seattle: Robert McNeel & Associates.
- Sarah Lees. (2019). In Conversation: Anila Quayyum Agha. San Francisco: Medium.
- SideFX. (2025). FX Features. Toronto: SideFX.
- SideFX. (2025). Fully Procedural. Toronto: SideFX.
- Stefan Kraus, Mxzehn. (2020). Introduction to Visual Programming with TouchDesigner. Toronto: Derivative.
- Studio Roosegaared. (2025). Dream Factory in Rotterdam – About Us. Netherlands: Studio Roosegaared.
- The Engineering Community. (2024). How dynamo Can Transform Your AutoCAD Workflow: A Beginner's Guide. Philadelphia: The Engineering Community.
- Zach Kron. (2014). Q&A about Dynamo. San Francisco: Autodesk.

### 3. 웹사이트

<http://www.adinews.co.kr/news/articleView.html?idxno=37260>. adinews.

(2025. 05. 13)

[http://www.timnobleandsuewebster.com/dirty\\_white\\_trash\\_1998.html](http://www.timnobleandsuewebster.com/dirty_white_trash_1998.html). Tim

Noble & Sue Webster. (2025. 08. 23)

[http://www.timnobleandsuewebster.com/miss\\_understood\\_1997.html](http://www.timnobleandsuewebster.com/miss_understood_1997.html). Tim

Noble & Sue Webster. (2025. 08. 23)

<https://blog.naver.com/need97/220452223269>. 네이버 블로그. (2025. 10.

12)

<https://derivative.ca/course/introduction-visual-programming-touchdesigner/62889>. Touchdesigner. (2025. 09. 02)

(2025. 09. 02)

<https://dynamobim.org/qa-about-dynamo/>. Dynamo. (2025. 09. 02)

(2025. 09. 02)

<https://en.japantravel.com/tokyo/teamlab-planets-tokyo/45504>.

Japantravel. (2025. 09. 05)

<https://news.lgdisplay.com/2016/12>. LG Display Newroom. (2025. 09. 01)

(2025. 09. 01)

<https://refikanadol.com/works/machine-hallucination/>. Refikanadol. (2025.

09. 08)

<https://refikanadol.com/works/machine-hallucination/>. Refikanadol. (2025.

09. 08)

<https://refikanadol.com/works/machine-hallucinations-sphere/>.

Refikanadol. (2025. 09. 08)

<https://www.anilaagha.com/installation#/a-beautiful-despair/>. Anila Qua

yyum Agha. (2025. 08. 24)

<https://www.anilaagha.com/installation#/intersections/>. Anila Quayyum

Agha. (2025. 08. 24)

<https://www.civicnews.com/news/articleView.html?idxno=1177>. Civic news.  
(2025. 05. 13)

<https://www.fetedeslumieres.lyon.fr/en/oeuvre/region-des-lumieres-fourviere?edition=2522>. Fete des Lumieres. (2025. 09. 08)

<https://www.sidefx.com/products/whats-new-in-195/>. Side FX. (2025. 09. 02)

<https://www.studioroosegaard.net/project/van-gogh-path>. Studio Roosegaard. (2025. 08. 24)

<https://www.studioroosegaard.net/project/waterlicht>. Studio Roosegaard. (2025. 08. 24)

<https://www.teamlab.art/ko/e/tokyo/>. Teamlab. (2025. 08. 24)

<https://www.youtube.com/watch?v=3Hec7pfx66A>. Youtube. (2025. 09. 02)

<https://yudeung.com/photo/list/2025/1>. 진주남강유등축제. (2025. 08. 27)

# ABSTRACT

## A Study on Computational Shape Making Using Light Source

Kim, Su-Han

Major in Visual Communication Design

Dept. of Media Design

The Graduate School

Hansung University

The purpose of this study is to automate the process of generating the target shape using the light projection mechanism and to establish a system that can quantitatively correct shape distortion occurring in the actual lighting environment. The researcher's existing projection-based formative research proposed a method of reducing repetitive experiments that occur in shape production with a proportional calculation method based on the ideal conditions of the point light source, but there was a disadvantage that the versatility was low because it had to be used by hand calculation. In addition, it is difficult to systematically reflect physical variables such as semi-shadow, diffusion, and boundary blur according to the light source area that inevitably occur in the actual surface light source, and as a result, it has limitations that cause structural differences between digital simulation and the physical

environment. In particular, the existing method of repeatedly measuring and correcting errors at individual points to ensure the accuracy of the shape was also limited in terms of reproducibility and efficiency.

Therefore, this study established a computational design process that converts the experimental structure established in previous studies into algorithmic procedures in a digital simulation environment using Rhinoceros and Grasshopper. First, we designed an algorithm that analyzes the outer information of the target shape to reversely calculate the first perforated pattern, and implemented a system that can automatically generate it in a digital simulation environment. In addition, in order to solve the shape displacement problem caused by the physical characteristics of the actual surface light source, a displacement analysis procedure was prepared based on the four pole points of the projected shape: up, down, left, and right. The analyzed displacement value is integrated into a single amount of correction, and the correction algorithm is configured to ensure the consistency of the overall shape proportion and the clarity of the local boundary at the same time. This process was optimized in the direction of minimizing the difference in shape between the digital simulation environment and the physical environment through an iterative calculation structure based on an objective function.

The established automation system was verified by comparing and analyzing the perforated patterns generated in the digital simulation stage with the corresponding actual projection experiment results. As a result, it was confirmed that the physical error occurring in the surface light source was effectively mitigated by applying a single offset-based correction algorithm, and the visual reproducibility of the target shape was significantly improved. This means that the intention of this study to systematically interpret and algorithmically integrate structural differences

between digital-physical environments beyond simply correcting the outline of the shape has been practically implemented.

The integrated algorithm and automation system proposed in this study provide the basis for the formative expression using the physical characteristics of light to expand beyond the experimental characteristics to the overall production environment. This expandability is expected to function as a new design infrastructure that can be applied to the overall light-based formative design, such as light art, public lighting, architectural envelope design, media facade, and interactive space production in the future. Furthermore, it can be evaluated as an important attempt toward standardization and automation of the design process in that it can quantify formative intentions and systematically manage uncertainties in the physical environment through digital algorithms.

**【Key words】** Light Source Projection, Computational Design, Digital Simulation, Automation System, parameters