

2025년 추계학술발표대회 : 대학생부문

건축설계 분야에서 파라메트릭 디자인의 적용 실태와 한계: 형태 · 성능 · 데이터 연계성 관점의 사례 연구

The Application and Limitations of Parametric Design in Architecture Design: Case
Studies from the Aspects of Form · Performance · Data Integration

○고 민 성* 정 태 종**
Ko, Min-Seong Jeong, Tae-Jong

Abstract

This study examines the practical application and limitations of parametric design in contemporary architecture, focusing on projects adopting fractal, Voronoi, and biomimetic principles since 2000. An analytical framework was developed across three dimensions—form, performance, and data integration—and applied to four representative cases: Eden Project, Water Cube, Al Bahr Towers, and One Ocean Pavilion. The results show that while parametric tools effectively supported form generation and structural optimization, their performance-driven and data-linked applications were inconsistent. Some projects achieved genuine integration of environmental and structural data, whereas others relied on parametric methods only nominally for visual expression. These findings highlight the need for clear criteria to distinguish between practical and nominal uses of parametric design and to guide its future development in architectural practice.

키워드 : 파라메트릭 디자인, 실제 적용, 명목상 활용, 과정-결과 일치성

Keywords : Parametric design, Practical implementation, Nominal application, Process-outcome consistency

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 파라메트릭 디자인(parametric design)은 복잡한 형상 구현과 설계 프로세스의 효율화를 가능하게 하며 현대 건축 설계의 핵심 도구로 자리 잡았다. 그러나 일부 프로젝트에서는 파라메트릭 기법이 실제 설계 과정에서 핵심적으로 작동한 경우와, 완성된 형상을 단순히 명목상 ‘파라메트릭’이라는 용어를 사용한 경우가 혼재되어 있다. 이러한 혼동은 파라메트릭 디자인의 개념적 진정성과 기술적 발전 가능성을 저해할 수 있다.

본 연구는 현대 건축물 중 파라메트릭 디자인이 실질적으로 기능한 사례와 그렇지 않은 사례를 구분·검증함으로써, 파라메트릭 디자인의 개념적 명확성과 건축 담론 내 신뢰성을 확보하는 것을 목적으로 한다. 특히, 설계 전 과정에서 파라메트릭 도구가 어떻게 적용되었는지, 그리고 그 결과물이 구조·외피·공간 구성 등에서 실제 기능적 성과를 창출했는지를 분석한다.

1.2 연구 대상 및 방법

본 연구는 현대 건축물 중 외관이 파라메트릭 디자인과 유사하나, 실제 설계 과정에서의 적용 여부가 명확히 검증 가능한 사례를 선별하여 분석하였다. 사례 선정은 다음 기준에 따라 이루어졌다:

- 1) 2000년대 이후 완공된 현대 건축물일 것
- 2) 공식 자료(설계 보고서, 인터뷰, 학술 논문 등)를 통해 설계 과정과 도구 사용이 확인 가능할 것
- 3) 구조·외피·공간 등에서 파라메트릭 도구의 기능적 적용 여부를 평가할 수 있을 것

선정된 사례는 총 4개이며, 각 사례에 대해 ▲설계 과정의 파라메트릭 적용 범위 ▲결과물의 기능적 성과 ▲기술적·개념적 한계점을 중심으로 평가한다. 분석은 문헌 조사와 설계 자료 검토, 그리고 파라메트릭 설계 요소별 비교·분석 프레임워크를 활용하여 진행하였다.

표1. 선정 사례

건축물	건축가	위치	연도
Eden Project	Nicholas Grimshaw	콘월, 영국	2001
Water Cube	PTW Architects + CSECE + Arup	베이징, 중국	2008
Al Bahr Towers	AHR	아부다비, 아랍에미리트	2012
One Ocean Pavilion	SOMA	여수, 대한민국	2012

* 단국대 공과대학 건축학부 학부과정
** 홍익대 건축공학과 조교수, 공학박사
(Corresponding author : jeongtj@hongik.ac.kr)

2. 문헌 고찰

2.1 파라메트릭 디자인의 개념과 전개

파라메트릭 디자인은 변수 간 관계를 모델에 내재화해 형상을 생성·변형하는 설계 방식이다. Schumacher(2009)는 이를 ‘Parametricism’이라 명명하며, 상이한 규모·프로그램의 복잡성을 연속적 차별화로 조직할 수 있다고 주장한다. Woodbury(2010)는 “형태보다 관계를 설계하는 방법”으로 개념화하며 모델의 구조·패턴·유연성을 핵심으로 본다. Oxman은 성능 지표와 형상 생성의 결합을 이론화하며, 환경·구조 성능 기반의 설계 전환을 제시했다. 최근에는 Parametricism이 사조인지 방법론인지에 대한 비판적 재검토가 이루어지고 있다.

2.2 설계 원리로서의 프랙탈, 보로노이와 생체 모방

파라메트릭 디자인 구현 방식 중 프랙탈(Fractal)과 보로노이(Voronoi), 그리고 생체 모방(Biomimicry)은 자연계의 기하·구조 원리를 설계에 적용하는 주요 방법론이다.

프랙탈은 자기유사성(self-similarity) 알고리즘을 반복 적용해 복잡성과 질서를 동시에 구현한다. 건축에서는 모듈 반복, 파사드 분할, 격자 최적화 등으로 나타나며, 자연의 성장 패턴과 유사한 형태를 만든다.

보로노이는 공간 분할(space partitioning) 알고리즘으로, 점 집합의 최근접 거리 기반 영역 구성을 통해 세포 조직, 거품 구조 등 자연의 패턴을 모사한다. 반복적 보로노이 세분화는 프랙탈적 성격을 띠며, 파사드나 구조 격자 설계에서 채광·환기·구조 효율을 동시에 달성하는 데 활용된다.

생체 모방은 Benyus(1997)가 정의한 대로 자연을 ‘모델·척도·멘토’로 삼아 설계에 적용하는 방법이다. 구조나 기능을 모사해 형태를 구현하고(모델), 자연의 최적화 원리를 성능 지표로 삼으며(척도), 지속가능성을 설계의 사결정에 통합한다(멘토). 건축에서는 거미줄의 인장 메커니즘을 응용한 구조, 흰개미 집의 자연 환기 시스템을 모방한 환경 설계, 조개껍질의 층상 구조를 활용한 재료 개발 등이 대표적 사례로, 파라메트릭 디자인과 결합해 형태와 성능을 동시에 최적화하는 데 활용된다.

2.3 기존 연구의 한계와 본 연구의 필요성

기존 파라메트릭 디자인 연구는 특정 알고리즘이나 설계 원리의 형태 생성 과정과 완성 결과물 분석에 주로 집중해 왔다(Schumacher, 2009; Woodbury, 2010). 이러한 접근은 파라메트릭 설계의 개념 확장과 담론 형성에 기여했으나, 다음과 같은 구조적 한계를 지닌다.

첫째, 적용 여부를 판별할 객관적 기준이 없다. 다수의 연구가 시각적 형상이나 설계자의 서술에 의존해 파라메트릭 적용 여부를 판단하며, 변수 정의·데이터 연계·버전 기록 등 설계 프로세스 전반에서의 실질적 적용 증거를 체계적으로 검증한 사례는 드물다.

둘째, 평가가 외형 디자인에 편중되어 있다. 외형에서 파라메트릭 특징이 명확한 Form-driven 사례가 주로 다뤄지고, 구조·환경·제작 과정에서 핵심적으로 작동한 Performance-driven 사례는 성능 분석의 일부로만 제한적으로 언급되는 경향이 있다.

셋째, 설계 원리와 적용 방식의 교차 분석이 없다. 기존 연구에서는 서로 다른 생성 원리를 동일한 분석 틀 안에서 비교하고, 이를 적용 가시성(Form-driven·Performance-driven)과 연계해 해석한 시도가 부족하다.

이러한 한계로 인해 ‘파라메트릭’이라는 용어는 실제 설계 프로세스에서 데이터 기반 연속 변형과 최적화를 거친 사례와, 완성 단계에서 부분적으로 알고리즘을 차용한 사례를 모두 포괄하게 되었고, 그 결과 개념적 모호성이 심화되었다.

따라서 본 연구는 2000년대 이후 준공된 현대 건축물 중 보로노이 기반과 생체 모방이 적용되었다고 명시된 사례를 대상으로 한다.¹⁾ 이 시기는 디지털 설계 도구가 상용화된 2000년대 초반으로 파라메트릭 기법이 실무에 본격적으로 확산된 흐름과 맞물린다. 이를 설계 단계별 자료, 구현 과정, 외형·성능의 가시성 평가를 포함한 분석 프레임에 따라 검증함으로써, 파라메트릭 설계의 실제 적용 실태와 경향을 체계적으로 규명하고 향후 평가 지표 마련의 기초 자료를 제공하는 것을 목표로 한다.

3. 건축설계안 사례 분석

3.1 분석 프레임 설정

본 연구는 파라메트릭 설계가 실제 설계·제작 과정 전반에서 핵심적으로 작동했는지, 혹은 완성된 형태 생성에만 제한적으로 활용되었는지를 판별하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 분석 프레임은 판별 항목, 실제 적용, 명목상 활용 세 축으로 구성하였다.

표2. 파라메트릭 설계 적용 판별 기준

구분	판별 항목	실제 적용	명목상 활용
설계 변수 정의	변수 설정 여부	변수명·값 명확, 조정 시 형상 변화	변수 불명확, 변화 영향 없음
데이터 연계 구조	변수·데이터 연결	변수 간 관계·외부 데이터 연계	관계 단절, 외부 데이터 미반영
자동화·최적화	반복·성능 반영	자동 반복·성능 기반 최적화	수동 조정, 후처리 장식
프로세스 증거	과정 기록	스크립트·버전·모형 자료 존재	기록·자료 부재
결과-과정 일관성	결과 일치	모델·완공물 일치, 변경 기록 있음	결과·모델 불일치

¹⁾ 프랙탈 유형은 현대 건축물 중 설계 전 과정에 일관되게 통합된 사례가 확인되지 않았고 일부 프로젝트에서 자기유사성을 차용한 반복 패턴이 존재하나, 이는 장식적 표현에 그쳐 파라메트릭 설계의 데이터 기반 최적화와 직접적인 연계가 미약하여 제외하였다.

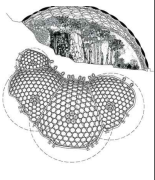
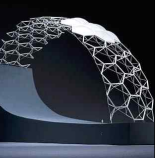
3.2 사례별 분석

사례는 2000년 이후 준공·공식 자료에서 해당 설계 원리 적용이 명시·설계 과정과 구현 증거가 확인 가능한 프로젝트 중에서, 평가 항목이 명확히 드러나는 4건을 선정하였다. 선정 시 외형과 성능 어느 한쪽으로 치우치지 않도록 Form-driven과 Performance-driven 사례를 균형 있게 포함하였다.

3.2.1 Eden Project

영국 콘월에 위치한 Eden Project는 기후대별 식물 생태를 수용하기 위해 지오데식 돔 구조와 ETFE 패널을 채택하였다. 돔의 육각형·오각형 패널 패턴은 프랙탈적 자기유사성을 띠며, 파라메트릭 모델링을 통해 곡면 구조 최적화와 패널 배치가 정밀하게 조정되었다. 구조 효율과 경량화를 동시에 달성했으나, 내부 미세 기후 조절은 주로 설비 의존적이어서, 형상 설계와 환경 성능 간의 직접 연계성은 제한적이었다.

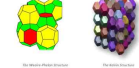
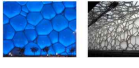
표3. Eden Project 판별 기준별 평가

이미지	평가 항목	실제 적용	명목상 활용
	설계 변수 정의	육각·오각형 패턴의 기하 규칙이 명확히 정의되어 파라메트릭 설계 조건을 확인 가능	변수 정의가 형상 생성에만 국한, 환경·구조적 데이터 연계 부족
	프로세스 증거	축소 모형 단계에서 형상 규칙성이 유지됨을 확인	제작 과정이 시각적 제시에 치중, 실제 제작 공정과의 연계 자료 부족
	결과-과정 일관성	실내 구조 형상과 설계 모델 패턴이 일치	구조 성능·재료 변화에 따른 유지 검증 부재
	전반 구조 일관성	완공물 외형이 설계 모델과 동일한 패턴·형태 유지	장기 유지관리 및 기후·환경 변화 대응성 평가 미흡

3.2.2 Water Cube

Water Cube는 2008 베이징 올림픽 수영경기장으로, Weaire-Phelan 기하를 외피와 구조에 적용하였다. 이는 비정형 거품 구조의 반복 모듈을 통해 자중을 줄이고 단열 성능을 향상시키는 전략으로, BIM과 파라메트릭 툴이 패널 모듈 설계·제작 전 과정에서 사용되었다. 결과적으로 외피와 구조가 통합된 고효율 시스템을 구현했으나, 운영 단계의 에너지 성능 검증 자료가 충분히 공개되지 않아 장기적 성능 평가에는 한계가 있다.

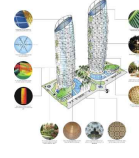
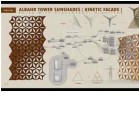
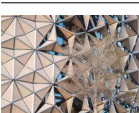
표4. Water Cube 판별 기준별 평가

이미지	평가 항목	실제 적용	명목상 활용
	설계 변수 정의 / 자동화·최적화	기하 규칙·형상 패턴이 변수로 명확히 정의되고 데이터 기반 형상 생성 진행	외부 환경 데이터·성능 데이터와의 연계 제한
	프로세스 증거 / 결과-과정 일관성	버블 구조 자동 배치·최적화 알고리즘 설계 단계 적용	일부 디테일 수동 조정
	결과-과정 일관성	완공 외피 형상이 초기 모델과 일치, 구조 논리 유지	장기 유지·성능 변화 검증 자료 부족
	설계 변수 정의 / 결과-과정 일관성	전체 구조 패턴이 설계 의도대로 일괄 적용, 시각 구현	기후 대응성·기능 변화 가능성 고려 부족

3.2.3 Al Bahr Towers

Al Bahr Towers는 아부다비의 고온다습한 기후 대응을 위해, 전통 마슈라비야를 재해석한 가동형 차양 시스템을 적용했다. 파라메트릭 제어 알고리즘이 실시간 태양광 데이터를 기반으로 차양 개폐 각도를 조절하여, 냉방 부하를 최대 50%까지 절감한 것으로 보고되었다. 환경 성능 중심의 대표적 Performance-driven 사례이나, 복잡한 기계 시스템으로 인해 높은 초기 설치비와 유지관리 비용이 발생하여, 적용 범위를 넓히는 데 한계가 있다.

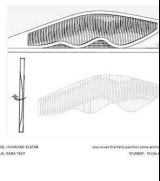
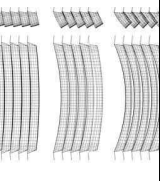
표5. Al Bahr Towers 판별 기준별 평가

이미지	평가 항목	실제 적용	명목상 활용
	설계 변수 정의 / 데이터 연계	태양 차양 패널의 개폐 각도·배열 간격 등 주요 변수가 명확히 정의되고 외피 형상에 반영됨	-
	자동화·최적화, 프로세스 증거	알고리즘 기반 자동 개폐 및 성능 최적화 시뮬레이션 결과가 설계 기록에 포함	-
	결과-과정 일관성	시뮬레이션과 완공 후 작동 패턴이 동일, 변경 사항 기록	-
	결과-과정 일관성, 변수 정의	전 외피에 동일한 차양 시스템 적용, 변수 설정이 완공 후에도 유지	-

3.2.4 One Ocean Pavilion

One Ocean Pavilion은 2012 여수 엑스포의 주제관으로, 해양 생물 형상을 모티브로 한 외피 패턴을 구현하였다. 구조 설계와 제작 과정에서 파라메트릭 모델이 활용되어 비정형 형상을 정밀하게 시공했으며, 곡면 패널과 구조 골조의 접합 최적화가 가능했다. 그러나 형상 모티프 구현이 주목적이었고, 외피 패턴이 실질적인 환경 성능 향상이나 구조 효율 최적화와 직접적으로 연결되었다는 근거는 제한적이었다.

표6. One Ocean Pavilion 판별 기준별 평가

이미지	평가 항목	실제 적용	명목상 활용
	설계 변수 정의	외피 파형의 진폭, 간격, 곡률 등 주요 변수가 명확히 설정되어 설계·제작 단계와 완공 후 형태가 일치함	환경 변수 정의 없이 형상이 시각적 조형에만 의존
	자동화·최적화	파형 패널의 곡률과 간격이 알고리즘 기반으로 자동화·최적화되어 제작 효율과 구조 안정성을 확보	변수 입력 없이 수동 조정 또는 단순 반복 패턴으로 배치되어 최적화 효과가 제한적
	데이터 연계 구조	제작 도면과 CNC 가공 데이터가 직접 연계	외부 환경 데이터와 연계 없이 제작
	결과-과정 일관성	완공 후 외피 파형과 패널 간격이 설계 모델과 동일하게 구현되며, 변경 사항이 기록·관리됨	-

3.3 소결

네 사례 모두 보로노이 또는 생체 모방 원리를 바탕으로 파라메트릭 설계 도구를 활용했으나, 적용 범위와 목적에서 뚜렷한 차이를 보였다. Eden Project와 Water Cube는 구조 효율과 시공 최적화에 주력했으며, Al Bahr Towers는 실시간 환경 대응 성능에서 강점을 보였다. 반면 One Ocean Pavilion은 외형 구현에 치중해 성능 최적화의 확장은 부족했다. 이는 향후 파라메트릭 설계 평가에서, 형태·성능·데이터 연계성을 종합적으로 검토하는 체계 마련이 필요함을 시사한다.

4. 결론

본 연구는 2000년대 이후 준공된 현대 건축물 중 보로노이(Voronoi)와 생체 모방(Biomimicry) 설계 원리를 적용한 사례를 선정하여, 설계 단계별 자료와 구현 과정을 분석함으로써 파라메트릭 설계의 실제 적용 여부와 활용 양상을 규명하였다. 분석은 형태 생성 원리, 적용 방식(Form-driven·Performance-driven), 적용 단계, 외피·구조·환경 성능과의 연계성을 기준으로 이루어졌다.

사례 분석 결과, 다음과 같은 특징이 도출되었다.

첫째, 파라메트릭 설계 방법론은 모든 사례에서 구조 형상 최적화와 제작 정확도 향상에 기여했으나, 성능 중심의 데이터 연계 여부와 범위는 사례마다 크게 달랐다.

둘째, Eden Project와 Water Cube는 구조 효율과 시공 최적화에 초점을 두었고, Al Bahr Towers는 실시간 환경 대응 성능에서 두드러진 성과를 보였다. 반면 One Ocean Pavilion은 외형 구현에 치중하여 성능 최적화 측면에서는 제한적이었다.

셋째, 외형 모티프에 차용하여 ‘파라메트릭 설계’로 분류되는 사례가 존재해, 적용 범위와 데이터 기반 설계의 구체성을 검증하는 객관적 평가 기준이 필요함이 확인되었다.

이러한 분석은 파라메트릭 설계 평가에 형태·성능·데이터 연계성을 통합적으로 검토하는 다층적 틀이 필요함을 시사한다. 본 연구는 향후 파라메트릭 설계의 적용 수준을 명확히 구분하고, 성능 최적화를 위한 도구 활용 방향을 제시하는 기초 자료가 될 수 있다. 다만, 사례별 설계 데이터와 장기 성능 검증 자료의 공개가 제한적인 탓에 분석 범위에 한계가 있었으며, 후속 연구에서는 실측 데이터 기반의 성능 평가와 다양한 프로젝트 유형 간 비교가 요청된다.

참고문헌

- Benyus, J. M. (1997). Biomimicry: Innovation inspired by nature. New York, NY: William Morrow.
- Mandelbrot, B. B. (1982). The fractal geometry of nature. New York, NY: W. H. Freeman.
- Schumacher, P. (2009). Parametricism: A new global style for architecture and urban design. Architectural Design, 79(4), 14-23.
- Oxman, R. (2009). Performance-based models in digital design: Beyond aesthetics. CAD & Design Computation Aided Architectural Design Futures, 36(6), 1026-1037. Available at Research Papers in Economics (RePEc): <https://ideas.repec.org/a/sae/envirb/v36y2009i6p1026-1037.html>
- Woodbury, R. (2010). Elements of parametric design. Retrieved from ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/272148176_Elements_of_Parametric_Design