2024년 춘계학술발표대회 : 일반부문

위상 최적화와 다이아몬드 볼트의 결합 가능성에 관한 연구
- 칼 뵈티허의 텍토닉 개념을 바탕으로 -

Exploring the Integration of Topological Optimization with Diamond Vault
- Based on Karl Bötticher's Tectonic Theory -

○박 세 진* 이 강 준**
Park, Se-Jin Lee, Kang-Jun

Abstract

This study explores the possibility of integrating topological optimization with diamond vault architecture from Karl Bötticher's tectonic perspective. According to Bötticher's concept of tectonics, topological optimization constitutes a kernform but not an a kunstform. To address this insufficiency, this paper proposes the possibility of combining the post-Gothic style of diamond vaults with topologically optimized forms. It is observed through a historical and conceptual overview and geometric analysis that both share the resultant effect of volumetric efficiency and the geometric principle of being interpreted and created based on points. Furthermore, in the procedural aspect, topologically optimized forms undergo the rationalization process to be transformed into industrially producible forms, where this research suggests that the reinterpretation of forms through diamond vaults becomes possible. Broadly interpreted, this study attempts to reconsider and restore the degree of architects' involvement in form, which has been gradually diminishing in the computational process, from Karl Bötticher's tectonic viewpoint.

키워드 : 텍토닉, 위상 최적화, 다이아몬드 볼트, 건축 형태, Rationalization, 건축 설계
Keywords : Tectonics, Topological Optimization, Diamond Vault, Architectural Form, Rationalization, Architectural Design

1. 서론

1.1. 연구배경 및 목적

건축에서 텍토닉(tectonic) 개념은 '물리적 영역과 정신적 영역이 어떤 인과율을 가지고 통합될 수 있는가'[1]라는 핵심적이고 논쟁적인 내용을 다루고 있다. 이러한 아포리아(aporia)는 케네스 프램튼(Kenneth Frampton)이 지적하듯, "새롭지도 않고 독특하지도 않으며, 사실 18세기 말부터 현대적 의식에 끊임없이 제기되어 오고 있는 것이다."[2] 그럼에도 불구하고, 이 물음이 현대 건축에서도 유효한 것은, 앞서 이를 아포리아라고 표현하였듯, 이 논쟁이 여전히 해결되지 않은 상태로 방치되고 있거나 혹은 더욱 심각해졌기 때문으로 보인다.

텍토닉 논의가 본격적으로 촉발된 19세기 독일의 건축사학자 칼 뵈티허(Karl Bötticher)는 위와 같은 텍토닉 개념에서의 이원성을 '핵심적 형태(kernform)'와 '예술적 형태(kunstform)'로 구분하고, 이 둘의 상호보완성을 강조하였다. 핵심적 형태는 건설과 구조, 재료를 강조하는 현실주의와 관련되어 있으며, 예술적 형태는 그리스 건축으로 대변되는 예술적 상징주의와 관련되어 있다.[3] 뵈티허의 텍토닉 이론에서 "예술적 형태는 핵심적 형태의 비역사성 때문에 필요하다. 즉, 예술적 형태는 역사적 형태를 표상함으로써, 구조미가 가지는 역사적 개념을 현대까지 연결시킨다"[4] 그가 예술을 역사성과 동치로 둔 것은 그가 활동한 19세기의 시대적 배경에 영향을 받은 것으로, 현대에는 이를 역사성으로 환원하지 않고서라도 해석이 충분히 가능할 것이다.

한편, 1980년대에 등장하여 건축에도 영향을 미친 위상 최적화(topological optimization)는 형상을 유한요소법(Finite Element Method, FEM)으로 해석하여 구조를 최적화하는 기법이다. 위상 최적화를 통해 만들어진 형태는 기존의 형태보다 복잡한 형태이긴 하나, 본질적으로는 오로지 힘과 그의 전달에 관한 것으로, 뵈티허의 개념에서 핵심적 형태의 영역에 속한다. 그러나 현대 건축에서 위상 최적화는 제너레이티브 디자인(Generative Design)의 유행 및 필요성에 힘입어 비판적인 고민, 즉, 예술적 형태에 대한 고민

* 한양대 대학원 석사과정
** 한양대 건축학과 교수
(Corresponding author : Department of Architecture, Hanyang University, leekangjun@hanyang.ac.kr)

1) 정인하, "고트프리트 젬퍼(Gottfried Semper)와 칼 뵈티허(Karl Bötticher)의 텍토닉 개념 비교", (건축역사학회논문집, 1998), 77p
2) Gevork Hartoonian, "Ontology of Construction: On Nihilism of Technology in Theoreies of Modern Architecture", 이종건 역, (시공문화사, 2008), 11p
3) 정인하, 앞의 책, 88p
4) Mitchell Schwarzer, "Ontology and Representation in Karl Bötticher's Theory of Tectonics", (Journal of the Society of Architectural Historian, 1993), 279p

없이 그대로 받아들여지고 있음이 발견된다. 이러한 과정에서 건축가의 형태에 대한 개입의 여지는 점점 좁아지고 있음이 자명해 보인다.

본 논문은 이 같은 상황에서 핵심적 형태와 예술적 형태의 절차적이고 결과적인 균형을 통해 위상 최적화된 형태에 건축가가 개입할 수 있는 여지를 탐구한다. 여기서 절차적 균형이란, 디자인 과정에서 핵심적 형태와 예술적 형태가 동등하게 고려됨을 뜻하며, 결과적 균형이란 디자인의 결과에서 핵심적 형태의 구조적 이점과 예술적 형태의 미적 아름다움이 균형 있게 나타남을 뜻한다.

1.2. 연구의 범위 및 방법

본 연구는 앞서 언급한 뵈티허의 텍토닉 이론에 충실한 관점에서, 과거의 건축 양식인 다이아몬드 볼트(diamond vault)[5]를 통한 위상 최적화된 슬라브 형태의 재해석 가능성 탐구를 목표로 한다. 이를 위해 본 연구는 다이아몬드 볼트에 관한 내용은 영국의 건축사학자 Zoë Opačić 런던 대학교(University of London) 교수의 저서 〈Diamond Vaults: Innovation and Geometry in Medieval Architecture〉[6]를, 위상 최적화에 관한 내용은 취리히연방공과대학교(ETH Zurich)의 Jipa 외 3명의 2016년 작업 〈3D-Printed Stay-in-Place Formwork for Topologically Optimized Concrete Slabs〉[7]를 중점적으로 참고할 것이다.

본 연구에서는 먼저 이론적 고찰을 통해 다이아몬드 볼트의 건축적 가치와 위상 최적화 방법론의 건축적 적용에 대해 개괄한다. 다음으로 각각의 기하학적 특성을 분석하고 이러한 특성으로 미루어보아 다이아몬드 볼트를 통한 위상 최적화된 형태의 재해석 가능성을 검토한다. 마지막으로 결과에 대해 고찰하며 연구의 건축적 의의와 확장 가능성, 그리고 후속연구에 대해 논의한다.

2. 이론적 고찰

2.1. 다이아몬드 볼트의 역사

다이아몬드 볼트는 15세기 말, 후기 고딕(Late Gothic) 양식으로 동부 독일의 마이센(Meissen)에서 등장하여 체코 공화국, 동부 독일 등 중앙 유럽을 중심으로 약 100년 넘게 유행했던 볼트 양식이다. 그림1에서 볼 수 있듯, 고딕 양식에서 나타나는 천장의 면이 기하학적인 패턴으로 분할되어(tessellated) 나타나는 것이 주된 특징이다.

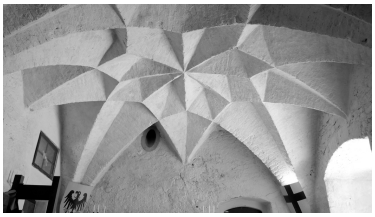

그림1. Trebsen Castle(16세기 초)의 다이아몬드 볼트

다이아몬드 볼트는 고딕 양식 볼트 중에서도 리브(rib)가 없는 형태로 발전하여 현대적 디자인이라는 평가를 받지만, 그에 비해 널리 알려지지 못하였다. Zoë Opačić은 앞서 언급한 저서에서 특히 체코 공화국에 남아있는 다이아몬드 볼트 양식의 건축물을 상세히 기록하였다. 이 지역의 다이아몬드 볼트가 가지는 특성은 다음과 같다. 첫째로, 높은 기하학적 복잡성과 완성도이다. 둘째로, 다양한 목적의 공간에의 적용이다. 셋째로는 자연 및 인공조명에 대한 적극적 대응이다. 이러한 특징들은 특히 체코에서 다이아몬드 볼트의 적용 범위가 세속화되었기 때문으로 예상된다.[8] 이에 따라 본 논문에서 주된 연구 대상으로 지정한 다이아몬드 볼트는 다음 표와 같다. 체코 공화국에서 나타나는 다이아몬드 볼트는 같은 건축물에 위치하더라도 공간에 따라 다른 방식의 볼트가 사용된 사례가 다수 발견되었기 때문에, 공간을 구분하였다.

표1. 다이아몬드 볼트 연구 대상 건축물

건축 및 구분		위치		건축	준공
명칭	공간	도시	국가	목적	연도(년)
Collin-Luther House	복도	Chomutov	Czech Republic	House	Early 1500
	방				
Franciscan Monastery and Church of the Assumption of the Virgin	복도	Bechyně		Monastery & Church	Early 1500
	방				
No. 25[9]	방	Slavonice		House	1540-50
No. 45	방				1540-50
No. 46	방				1540-50

2.2. 위상 최적화의 이론적 고찰

1988년 Bendsøe&Kikuchi의 연구[10]에서 시작된 위상 최적화는 SIMP(Solid Isotropic Material with Penalization), ESO(Evolutionary Structural Optimization), BESO(Bi-directional Evolutionary Structural Optimization) 등 다양한 방식으로 발전하였다. 이러한 방법론의 근간에는 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)이 있다. 유한요소해석, 혹은 유한요소법은 구조를 유한(有限)개의 요소로 치환하여 각각의 요소에 대한 구조적 해석을 진행하는 방식이다. 위와 같은 위상 최적화의 궁극적인 목표는 주어진 조건과 목표를 바탕으로 구조의 재료 배치를 최적화, 즉 효율화하는 것이다. 효율화의 결과는 결국 재료사용의 최소화로 연결된다. 이러한 특성은 건축에서도 다양한 스케일(scale) 상에서 적용되고 있다. 2011년 이소자

---

5) 다이아몬드 볼트는 셀 볼트(cell vault), 크리스탈 볼트(crystal vault)로 불리기도 한다. 특히 다이아몬드 볼트가 유행한 지역인 독일에서는 'Zellengewölbe'라 하는데, 이를 영어로 직역하면 'Cell Vault'이다.

6) Zoë Opačić, "Diamond Vaults: Innovation and Geometry in Medieval Architecture", (Architectural Association, 2005)

7) Andrei Jipa 외 3명, "3D-Printed Stay-in-Place Formwork for Topologically Optimized Concrete Slabs", (TxA Emerging Design + Technology, 2016)
https://dbt.arch.ethz.ch/project/topology-optimisation-3d-printed-slabs/
위 논문을 포함한 일련의 작업

8) Zoë Opačić, 앞의 책, 6p

9) No.OO의 표기는 Zoë Opačić의 앞의 책 표기에 따른 것으로, 일반의 거주용 주택이기 때문에 특정한 명칭이 없어서 편의상 붙인 것이다.

10) Bendsøe 외 1명, "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method", (Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988), 197-224p

키 아라타(Arata Isozaki)의 Qatar National Convention Centre는 이 방법을 건축물에 전면적으로 적용하였고, 2016년 Jipa 외 3명은 위상 최적화 슬라브를 개발한 사례가 있다.

그림2. Qatar National Convention Centre(2011, 왼), Topological Optimized Slab Prototype A(2016, 오)

3. 기하학적 분석과 재해석 가능성 검토

3.1. 다이아몬드 볼트의 기하학적 특징

다이아몬드 볼트의 기하학적 원리는 '테셀레이션(tessellation)'으로, 각 평면 위의 한 개 이상의 점(point)에 대해 각 점과 꼭짓점을 이은 선분으로 면을 분할 하는 것이 일반적이다. 이때 이 점은 각각의 사례마다 다양한 방식으로 정해지는데, 무게중심(centroid) 등 변을 제외한 면 위의 점을 이용해 분할 하거나(그림3 Collin-Luther House-Room Step3, Architecture No. 45 Step2 등), 변을 등분하는 중점(midpoint)을 이용하여 분할 하는 방식(그림3 Collin-Luther House-Aisle Step2, Monastery and Church-Aisle Step2)이 일반적이다. 그림3에서 벽에서 벽, 벽에서 기둥, 혹은 기둥에서 기둥으로의 한 칸을 베이(bay)라 한다. 각 베이에서 상부 방향으로 접힌 부분을 점선으로 표시하였고, 하부 방향으로 접힌 부분을 실선으로 표시하였다.[11]

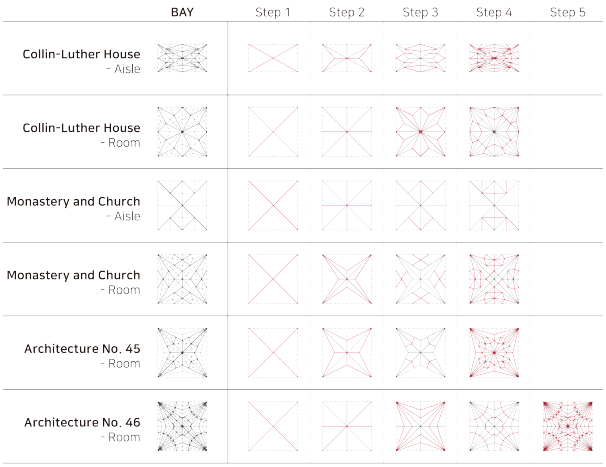

그림3. Bay Tessellation Process

위와 같은 분석에 따라 다이아몬드 볼트의 기하학적 특징을 다음과 같이 정리할 수 있다.

ⓐ 최초 분할의 경우, 접히는 방향을 반드시 일정하게 유지
ⓑ 가장 마지막에 분할된 면은 반드시 상부 방향으로 접힘
ⓒ 가장 마지막 분할은 직전 단계에서 나누어진 면에 대해 삼분할(三分割), 혹은 사분할(四分割) 되는 것이 지배적임
ⓓ 상부로 접힌 면을 다시 상부로 접지 않음

이 같은 특징들에 의해 다이아몬드 볼트는 복잡하지만 정제된 기하학적 형태를 가질 수 있었던 것으로 보인다. 또한 ⓐ와 ⓓ에 의해 구조적으로 안정될 수 있었고, ⓑ와 ⓒ에 의해 실제보다 높은 천장고(ceiling height)를 확보할 수 있으며 동시에 명암을 활용하여 공간의 아름다움을 극대화할 수 있었다. 결과적으로, 다이아몬드 볼트가 등장한 시기에는 고려된 부분은 아닌 것으로 보이지만 현대에서 유의미하게 보이는 것은, 다이아몬드 볼트를 적용하면 기존의 볼트를 적용했을 때보다 볼트의 전체, 즉, 슬라브의 체적(volume)이 줄어든다는 점이다.[12]

3.2. 위상 최적화의 기하학적 특징

컴퓨터로 인해 해석되는 과정을 거쳐야 하는 위상 최적화는, 유한요소해석을 거치기 때문에 각 요소에 데이터를 가진 형태로 결과물이 출력된다. 이에 따른 3D 모델링 소프트웨어상에서 가장 기본적인 위상 최적화 결과의 데이터 형태는 메쉬(mesh)이다. 메쉬는 각 점에 좌표값, 색상값 등의 데이터를 가지고 있고, 이 점을 특정한 알고리즘을 이용해 이어서 만든 3D 모델링 소프트웨어상의 면(surface)이다. 그림4는 McNeel사의 3D 모델링 소프트웨어 Rhinoceros 7과 그 Add-on인 Millipede를 사용하여 Jipa외 3명의 위상 최적화 슬라브를 컴퓨터상에 구현한 것으로, 메쉬의 각 점이 가진 색상값에 의해 힘을 많이 받는 구간을 흰색으로, 적게 받는 구간을 검은색으로 표현하였다. 그리고 이 값을 이용해 힘을 z-vector 값을 적용하여 높낮이가 있는 입체적 면을 생성하였다.

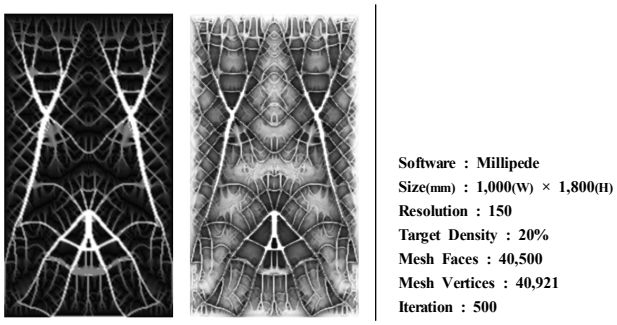

그림4. Topological Optimized Slab in Mesh

이렇게 생성된 메쉬 데이터를 실제 생산이 가능하도록 변형하는 과정을 디지털 패브리케이션(Digital Fabrication)에서 Rationalization이라 한다. Jipa 외 3명은 위 과정에서 Catmull-Clark and Loop Subdivision Algorithms을 사용하였다고 언급하였다[13]. 이 Rationalization 과정에서 다소 거칠게 나타났던 면들이 다듬어지고, 동시에 기술의 제약으로

11) 그림3에서는 표1에서 언급한 건축물 No. 29에 대한 분석은 제외하였는데, 이는 건축물 No. 29의 천장 형태가 No. 45와 비율을 제외하고 같기 때문이다.

12) 슬라브의 체적 효율화가 고려되지 않았을 것으로 추측하는 이유는, 다이아몬드 볼트는 벽돌쌓기 이후 스투코(stucco) 등으로 마감하는 방식으로 제작되기 때문에, 체적의 효율화를 통해 얻을 수 있는 구조적인 이점이 없거나 매우 적기 때문이다.

13) Andrei Jipa 외 3명, 앞의 책, 101p

생산 불가능했던 부분들을 생산 가능한 형태로 변형한다. 이와 같은 분석에 따라 위상 최적화의 기하학적 특징을 다음과 같이 정리할 수 있다.

ⓐ 위상 최적화 과정을 거치면 각 점에 색상값을 포함하는 메쉬가 도출됨

ⓑ 각 점에 포함된 색상값은 높이 등 형태 관련 데이터로 치환 가능함

ⓒ 위상 최적화 과정을 거친 데이터는 Rationalization 과정을 거쳐야만 생산 가능한데, 이 과정에는 미적(aesthetic)인 판단이 개입될 수 있음

3.3. 위상 최적화와 다이아몬드 볼트의 결합 가능성 검토

위와 같은 분석들에 따르면 위상 최적화와 다이아몬드 볼트는 결과적 동일성을 공유하는데, 바로 체적의 효율화 달성이다. 위상 최적화는 체적의 효율화 자체가 목표이지만, 다이아몬드 볼트에서 달성되는 체적의 효율화는 결과론적인 것으로, 본래의 목표는 미적인 것으로 추정된다.

또한, 위상 최적화와 다이아몬드 볼트는 기하학적으로 '점'을 기반으로 해석되고 생성된다는 공통점을 가지고 있다. 위상 최적화 과정을 거친 점 기반의 데이터가 높이 등 형태 관련 데이터로 치환 가능하다는 것을 고려해본다면, 위상 최적화의 결과물을 다이아몬드 볼트의 형태 논리로 재해석할 수 있다는 가능성을 확인할 수 있다.

특히, 앞서 언급하였듯이, 위상 최적화의 결과물은 생산 가능한 형태로 변형되기 위해 적절한 Rationalization 과정을 거쳐야 하는데(그림5), 이 과정에서야 비로소 다른 과정에서는 불가능했던 미적 판단이 개입될 수 있는 여지가 생기게 된다. 그러나 기존 Rationalization 과정은 생산을 위한 하나의 '문제 해결 과정'으로 여겨지는 것이 지배적인 관점이었다. 이는 서론에서 개괄하였듯, 물리적 영역, 즉, 핵심적 형태에 대한 논의에 해당하지만, 정신적 영역, 즉, 예술적 형태에 대한 논의에는 해당하지 않는다.

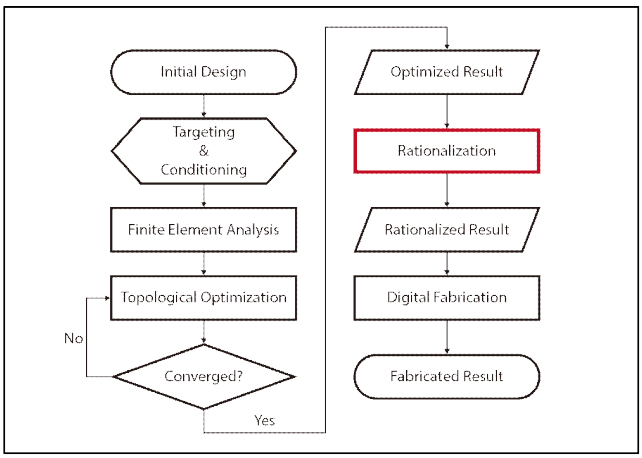

그림5. Topological Optimized Result Fabrication Flowchart

4. 결론 및 후속연구

본 연구는 1980년에 등장하여 최근에도 활발히 연구되고 있는 위상 최적화와 15세기 말 후기 고딕 양식으로 등장한 다이아몬드 볼트의 결합 가능성에 대해 검토한다. 이러한 작업은 위상 최적화와 같이 CAD(Computer Aided Design)를 적극적으로 도입한 디자인 분야에서 점차 희미해져 가는 건축가의 형태에 대한 관여도를 칼 뵈티허의 텍토닉 관점에서 재고하고 회복하려는 하나의 시도이다.

위상 최적화와 다이아몬드 볼트 각각의 기하학적 특징을 분석한 결과, 모두 '점'을 기반으로 해석되고 생성된다는 공통점을 가지고 있었다. 또한, 다이아몬드 볼트에는 초기부터 의도한 것은 아닌 것으로 추측되지만 결과적으로 체적을 효율화하는 효과가 있다. 이는 위상 최적화의 목표인 재료사용의 최소화와 합치될 가능성이 있는 부분으로 사료된다.

형태에 대한 개입은 위상 최적화된 형태를 실제 생산 가능한 형태로 변형하는 과정인 Rationalization 과정에서 일어날 수 있다. 사실상 컴퓨터에 의한 연산 결과의 연속인 전체적인 과정에서 Rationalization 과정에서만 유일하게 건축가의 형태에 대한 개입이 가능하기 때문이다.

본 연구는 광의(廣義)적으로 '위상 최적화와 같이 컴퓨터 연산으로 도출된 형태에 건축가의 의도를 담는 방법에 관한 탐구'로 읽힐 수 있을 것이다. 본 연구에서 제시하는 것은 그러한 많은 방법 중 뵈티허의 텍토닉 관점에 충실하게 따른 것으로, 서론에서 언급하였듯 그의 이론에서의 예술을 당시의 관점(곧, 역사성)이 아닌 현대적 관점으로 해석하여도 충분히 유의미한 논의가 될 것이라고 예상한다.

후속연구로는 가능성에 대한 검토에서 끝나지 않고, Jipa 외 3명의 작업처럼 프로토타입(prototype)을 제시하여 연구를 시각화하고 현실화하는 과정이 필요할 것이다. 이와 같은 후속연구는 건축가가 본 연구가 시도하려는 바를 그들의 실무에 적용할 수 있도록 하는 계기가 되어줄 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 정인하, "고트프리트 젬퍼(Gottfried Semper)와 칼 뵈티허(Karl Bötticher)의 텍토닉 개념 비교", 건축역사학회 논문집, 7호 4권, 1998
2. Gevork Hartoonian, "Ontology of Construction: On Nihilism of Technology in Theoreies of Modern Architecture", 이종건 역, 시공문화사, 2008
3. Mitchell Schwarzer, "Ontology and Representation in Karl Bötticher's Theory of Tectonics", Journal of the Society of Architectural Historian, 1993
4. Zoë Opačić, "Diamond Vaults: Innovation and Geometry in Medieval Architecture", Architectural Association, 2005
5. Andrei Jipa 외 3명, "3D-Printed Stay-in-Place Formwork for Topologically Optimized Concrete Slabs", TxA Emerging Design + Technology, 2016
6. Bendsøe 외 1명, "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988