디지털 건축 디자인 연구

Investigations into Digital Architectural Design

토니 코트닉 | Toni Kotnik

연산 가능한 함수(Computable Function)

1963년, 이반 서덜랜드의 스케치패드(Sketchpad)는 컴퓨터로 제도와 모델링을 할 수 있음을 보여주었다. 그때부터 1990년대까지 그래픽 소프트웨어 없는 건축 업무는 상상할 수 없었다. 현재 디지털 디자인 기술은 건축 실행에서 지배적인 생산 도구로 널리 적용되고 있다. 그러나 컴퓨터를 제도 기구로 사용한다고 해서 무조건 디지털 방식의 디자인이라 할 수는 없다. 디자인 과정은 여전히 종이를 기반으로 하던 때 습관적으로 디자인에 접근하던 방법과 크게 다르지 않기 때문이다. 디지털 디자인은 단순한 표현을 넘어서는 것이다.

디지털 기술은 현재의 디자인 이론과 교육 개념을 재검토할 만큼 새로운 방법의 디자인을 가능하게 한다. "우리 주변에서 일고 있는 지적 혁명"이 건축에서도 진행되고 있다. "하지만 그것을 감지하는 사람은 거의 없다. 컴퓨팅에 기반을 둔 사고는 공학과 인문학 연구 모두에 영향을 준다… 인간이 생각하는 방식을 바꾸고 있는 것이다."▼[1] 하지만 현재 건축의 디지털 담론 중 '지적 혁명'을 야기한 컴퓨터 그 자체를 논하는 것은 없다. 디지털에 의한 기계와 그 기능성의 변화를 계속 간과한다. 컴퓨터는 인간이 사용자로서 디자인 문제에 접근하는 방식에 능동적으로 영향을 준다. 모리스 메를로 퐁티는(Merleau-Ponty)는 인체를 물리적 혹은 인식 체계의 상태뿐 아니라 생물학적 · 현상학적으로 살아있고 체험하는 구조체로 봐야 한다고 지적했다. 인간은 주로 신체와 환경의 상호작용을 통해 세계를 이해한다. 모든 도구는 특정한 용도로 쓰임으로써 사용자의 인식과 생각하는 방법에 영향을 주면서 이러한 상호작용을 중재한다. 나는 컴퓨터의 기능성, 즉 컴퓨터의 다용성을 야기한 기본 개념을 조명하면서 디지털 건축 디자인을 연구하기 시작했다. 물리적인 기계로서의 컴퓨터는 존 폰 노이만의 연산 기계 디자인 원리에서 유래한다. 이 원리는 앨런 튜링의 컴퓨팅에 대한 추상적 착상과 기계에 대한 보편적 아이디어를 결합한 것이다. 컴퓨터의 일반적인 주 구성 요소(기계, 하드웨어, 데이터 조작과 명령 집합, 소프트웨어)는 컴퓨터를 다재다능하게 만든다. 이러한 기본 설정에서, 모든 데이터의 부분들은 비트(bit)의 유한수열(finite sequence)을 형성해 자연수로 코드화될 수 있다. 즉 프로그램 p는 자연수 집합 N의 부분함수(partial function)이고, N의 부분집합 Para를 정의한 함수는 Para의 원소 in을 입력하면 컴퓨팅을 통해 N의 부분집합 Var의 원소 out을 도출한다(p(in) = out).(Fig 1) 튜링의 모델을 기본으로 보면, 컴퓨터를 사용한다는 것은 항상 입력값과 결과값의 중재자인 연산 함수 p를 필요에 따라 한정함을 의미한다.

위와 같이 추상적이고 이론적인 서술은 우리가 컴퓨터를 사용하는 방법을 형식적으로 해석한 것으로, 이는 CAD 소프트웨어를 사용하는 건축 제도 · 모델링 작업에서 명료해진다. 이와 같은 시스템의 모든 작업은 수학적 함수를 구성하는 세 요소가 결정한다. 첫 번째 요소는 '선 그리기' 같은 도구의 활성화로, 이는 함수 p를 변형 알고리즘 규칙으로 정의한다. 두 번째는 모든 가능성에서 한 쌍의 점을 입력값(Para의 요소 in)으로 선택하는 것, 마지막은 모든 가능성 중 특정 두 점 사이의 선으로 묘사되는 결과물(Var의 요소 out)이다.(Fig 1) 컴퓨터를 디자인 과정에 도구로 통합하는 것은, 연산 가능한 함수를 디자인 도구로 하는 요소(개체 집합 간 형식적 관계, 이런 집합의 정량 가능성, 다양한 정량 가능성의 알고리즘적 변형과 상호작용)를 의식적으로 탐구하기 위해서다. 디지털 디자인 과정에서 형상 생성 기하학(form-generating geometry)보다 연산 가능한 함수의 잠재적 논리가 더 중요해지는 것이다.

지난 십 년 동안 나는 DOCT.아키텍츠(취리히)의 작업과 이론 저술, 학교(AA, ETH, 인스부르크대학교 실험건축학회) 강의를 통해 연산 가능한 함수의 논리와 건축의 내재된 잠재력를 중심으로 디지털 디자인을 연구했다. Para를 입력해 Var를 산출하는 형식을 바탕으로, 증가하는 기술적 · 개념적 복잡도에 대한 세 종류의 디자인 연구(분산, 재귀, 체계적 상호작용)가 가능하다.(Fig 2)

분산(Variation)

건축 설계는 물질을 배열해 조직적 공간 유형을 창조해야 한다. 그러므로 건축에 형식적으로 접근할 때 기하학적 묘사와 운용은 중요하다. 나는 디자인 접근법에서, 분산(Variation)에 의한 탐구로 연계성을 가진 기하학적 운용 순차를 활용한다. 이런 순차는 조직적 공간 유형의 연산적 서술 p로서 디자인 과정에서 이중으로 작동한다. 하나는 '두 갈래로 나뉜 다리' 프로젝트의 구성 요소와 U자형 단면에서 볼 수 있듯 기하학적 관계 함수 p의 매개변수 in(in ∈ Para)의 분산을 적용해 변하는 국지적 상황에 따라 공간 유형을 적용한다.(Fig 3) 이 프로젝트에서 구성 요소의 모양은 기하학적 운용의 순차로 정의되고, 윤곽선을 따라 주어진 위치와 초점의 상대적인 위치에 끊임없이 적응한다.

다른 하나는, 입력 매개변수의 연속 분산의 결과값은 가능한 공간 유형의 집합 Var의 원소가 된다. 공간 유형은 잘 알려진 유형학(typology)의 건축적 잠재력 연구를 촉진시킨다. 이 접근법을 베트남 호치민의 6지구 도시 마스터플랜 디자인에 활용했다.(Fig 4) 이 프로젝트에서 주거 · 복합 용도 도시 구역과 중정이 있는 주택의 원형에 기반을 둬 다양한 정도의 개방성과 사생활을 가진 두 종류의 분산이 만들어졌다. 이는 도시계획의 기본 구성 요소가 되었다.

재귀(Recursion)

The Computable Function

In 1963, Ivan Sutherland's Sketchpad program demonstrated that computers could be used illustratively, for both drafting and modeling. By the mid-1990s, it had become unthinkable to conduct an architectural practice without the inclusion of graphics software, and today, digital design technologies have been adopted almost universally as the predominant means of architectural procedure and production. Using the computer simply as a drafting tool, however, doesn't by default signal 'digital design', as the design process is still in line with the visual reasoning of a conventional paper-based design approach. Digital design is about going beyond the merely representational.

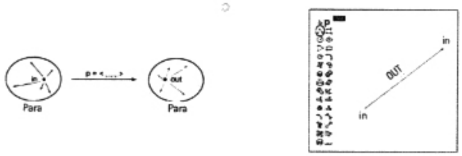
Digital technologies have enabled new methods of design, leading to the current re-examination of design theory and educative platforms. In this sense, architecture is partaking in an "intellectual revolution [that] is happening all around us, but few people are remarking on it. Computational thinking is influencing research in almost all disciplines, both in the sciences and in the humanities. . . . It is changing the way we think." The computer however, as the main bearer of this "intellectual revolution," is not part of the ongoing discourse surrounding the digitization of architecture. It is constantly overlooked; the machine and its functionality are relegated to a discursive blind-spot, little considered in their changeability. And yet, it is computers that actively shape the way we as users approach design questions. It was Merleau-Ponty who pointed out that we as humans must see our bodies not only as the physical context or milieu of cognitive mechanisms, but also as living, experiential structures that are both biological and phenomenological. A human understanding of the world depends, in the most part, upon the interaction of the body with its environment. Every tool necessarily mediates this interaction as a result of its particular attributes, thereby influencing the perception of the user and his way of thinking.

The starting point of my own investigation into digital design in architecture, therefore, was a far more rigorous consideration of the basic functionality of the computer, paying attention to that which enables its versatile application. As a physical machine, computers have their origin in John von Neumann's design principles for a computing mechanism, a set of directives developed from Alan Turing's more general abstract conception of computation and the related idea of a universal machine. The versatility of a computer is built upon the generality of its main constituents: a machine, hardware, manipulating data according to a set of instructions, software. In this general setting, every piece of data takes the form of a finite sequence of bits, which is why it can be coded as a natural number. Thus, a programme p can be viewed as a partial function on the set of natural numbers N, meaning a function defined on a subset $\mathbf{Para} \subseteq \mathbf{N}$ with output $\mathbf{out} \in \mathbf{Var} \subseteq \mathbf{N}$ as the result of a computation of the input $\mathbf{in} \in \mathbf{Para}$, that is $\mathbf{p}(\mathbf{in}) = \mathbf{out}$. (Fig 1) Based on Turing's model, this equation reveals that using a computer always means, without exception, the necessary limitations on computable functions **p** as a mediator between input and output.

Such a seemingly abstract and theoretical description is a direct formal translation of the way one works with computers, a relationship which becomes obvious when drafting and modeling architecture using contemporary CAD software. Every task in such a system is governed by the three components of a mathematical function: the activation of the tool, e.g., draw a line, as algorithmic rules of transformation that define the programme **p**; the selection of a pair of points as chosen element $\mathbf{in} \in \mathbf{Para}$ within the set of all possible pairs of points in space; and the resultant graphic output $\mathbf{out} \in \mathbf{Var}$, as the specific line between the points as out of the set of all possible lines. (Fig 1)

The purpose of integrating computers as tools into the design process, therefore, lies in the rigorous exploration of the defining elements in a computable function, manipulated as design tool. One must observe the formal relationship between sets of entities, the quantifiable properties of these sets of entities, and the algorithmic transformations and interactions between different quantifiable properties. As such, in this digital design process, attention shifts away from the form-generating geometry itself towards the logic of an underlying computational function!

It is this navigation within the logic of computational functions, and their underlying architectural potential, that has led my



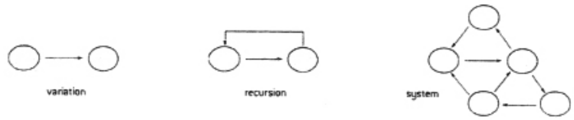


Fig 1
디지털 디자인은 입력값집합과 출력값집합의 알고리즘 관계인 연산 가능 함수를 활용한다. 건축 디자인에서 두 집합은 주로 점, 선, 면 등의 기하학적 개체로 정의된다. 그리고 그 관계는 연속적인 기하학적 연산에 의해 형성된다.
Digital design is conscious utilisation of computable functions, an algorithmic relationship between an input set and an output set. In most applications in architecture these two sets are defined by geometric entities like points, NURBS curves or surfaces and the relationship is given by a sequence of geometric operations.

Fig 2
분산, 재귀, 체계는 입력값집합과 출력값집합의 유형의 복잡도에 따라 구조적 편차를 보인다.
Structural differentiation between the concepts of variation, recursion and system is based on the complexity of the type of concatenation of input and output sets.

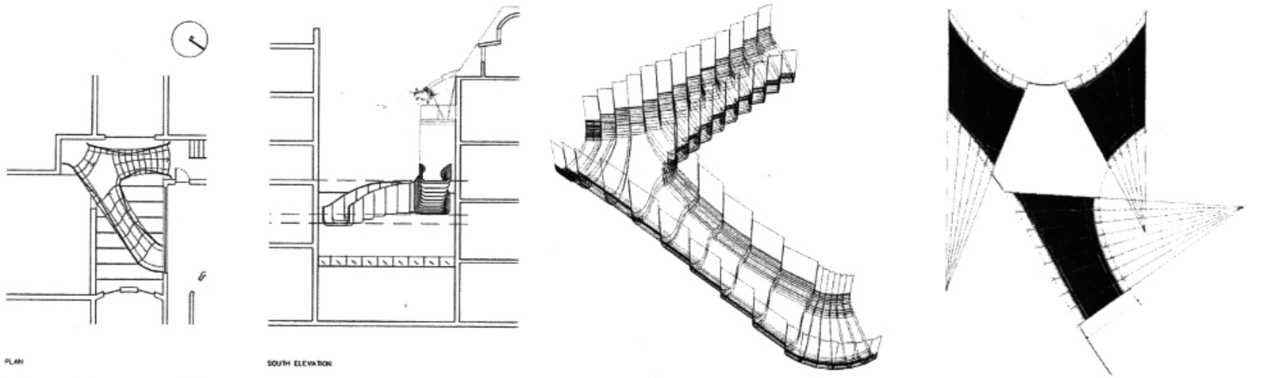


Fig 3. Bifurcating Bridge, AA EmTech, 2010
U자형 다리구조는 연속적인 기하학적 연산을 통해 만들어졌다. 연산은 세 초점과 세 경계선의 위치에 기반한다. 결과적으로각도, 높이, 계단폭의 국지적 변화에 적응하는 구조적 분산이다.
The U-like frames of the bridge are developed through a sequence of geometric operations out of the relative location with respect to three focal points and the position along the three bounding curves. This results in variations of the frame which can adapt constantly to the changing local conditions of angles, height and step width.

두 가지 형태의 변형 연구 결과물인 조직적 공간 유형의 복잡도는 기하학적 운영에 내재된 순차의 직접적인 결과다. 함수 p에 내재된 논리는 디자인을 즉각 통제한다. 형식적 디자인 방법의 주된 한계를 극복하는 가장 단순한 방법은 결과물 out ∈ Var을 연산 가능한 함수 p에 피드백함으로써, 입력값 in ∈ Para의 직선적 처리 과정을 벗어나는 것이다. 피드백은 in과 out의 고정된 관계 p를 역동적 진전 과정으로 변환한다.

귀납적 과정에서는 간단한 기하학적 운영으로 예상 밖의 복잡도를 가진 공간 유형을 만들어낼 수 있다. 추상적 조각 '역사의 흔적(Trace of History)'은 이런 현상을 잘 설명한다. 이는 귀납적 과정을 기반으로 회전과 이동을 간단하게 조합해, 인간이 순서에 대해 지닌 인식의 한계를 연구한 작업이다.(Fig 5) 또한 재귀는 공간 유형이 발전 과정에서 연속 피드백을 통해 적응해갈 수 있게 하는 잠재적 적응성을 내재한 과정이다. 이 현상을 실험적 무용 극장에 적용해 더 자세히 연구했다.(Fig 6) EEG · ECG · EMG · EOG · PSG 신호를 측정하고 기록하기 위해, 무용가를 가벼운 무선 생리 모니터에 연결한다. 생리적 측정치는 무용가의 신체 상태 정보를 제공한다. 이는 실시간으로 시청각 정보로 전환되고 무용가는 그에 맞춰 자신의 전자적 서술을 상대로 파드되(pas de deux: 발레 2인무)를 출 수 있다.

조직의 수행적(operative) 유형을 생성하기 위해 셀룰라 오토마타(cellular automata)를 여러 공모전 출품작의 재귀 체제로 이용해 재귀의 두 가지 현상, 복잡도와 적응성의 건축적 잠재성을 심도 있게 연구했다. 셀룰라 오토마타는 2진법 수열을 자기 자신에게 사상(map)하는 연산 함수 p로 볼 수 있다. 즉 N을 시스템 내부 세포(cell)의 개수로 볼 때, $p: \{0,1\}^N \rightarrow \{0,1\}^N$가 된다. 대부분의 디자인 프로그램에서, 셀룰라 오토마타는 규칙적인 그리드(grid)를 기반으로 유형을 생성하기 위한 간단한 이산계 모델(discrete model)로 사용된다. 생물학과 의학에서 상호작용하는 세포 시스템 연구나 도시 성장의 전략 시뮬레이션이 그 예다. 공모전 출품작을 보면, 함수 p는 공간 유형을 구성하기보다 연속적으로 반복되는 식별 절차의 상태(flag)로 사용되기 위한 2진법 값을 각 단위 개체에 배정한다. 이러한 이유로, 존 콘웨이의 유명한 '인생게임(Game of Life)'과 유사한 규칙을 사용해 셀룰라 오토마타가 인접한 개체의 적합도 측정 시험과 연관될 수 있고, 결과적으로 수행적 인접 개체의 집합은 커진다. 고층 건물 디자인에서는, 위와 같은 전략을 외부 구조 시스템인 동시에 차양막인 파사드의 기초 구조 같은 다양한 구성 요소에 적용했다.(Fig 7) 난초 온실 공모 출품작에서 셀룰라 오토마타는 지붕 공간을 분화해 표면에서 빗물의 흐름을 통제하고, 집열판으로 난방에 필요한 에너지를 확보하도록 했다.(Fig 8) 슬로베니아 산간 지역의 방문자 센터 디자인에서 셀룰라 오토마타는 인접한 슬래브를 따라서

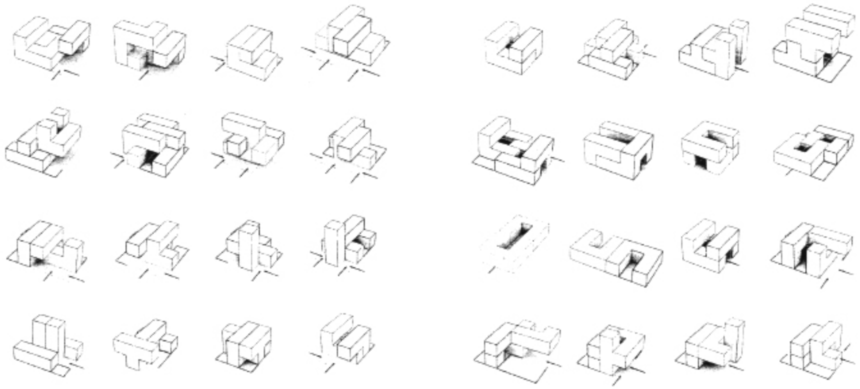


Fig 4. Seeding City Centers, Conceptual Masterplan for District 6, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2009 (invited competition, collaboration with AVA Studio)
호치민 시 제6구역의 재개발을 위해 제시된 새로운 주거 형태는 복합단지나 중정이 있는 집의 전통적 유형학을 기반으로 디자인되었다.
Tetris-like combinatorial variation of traditional typologies of mixed-used urban blocks and courtyard houses as study on new forms of living for the regeneration of district 6 in Ho Chi Minh City.

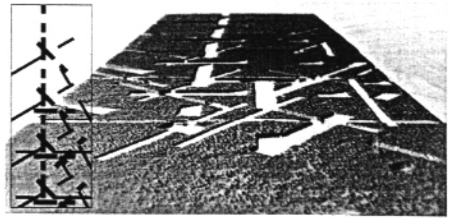


Fig 5. Trace of History, plaster, 2004
단순한 기하학적 연산의 재귀에 의한 복잡도의 인식의 한계에 대한 실험
Exploration of the limit of perception of complexity through recursive application of simple geometric operations

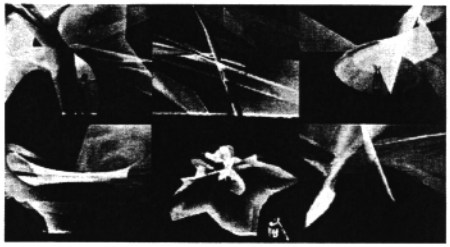


Fig 6. Stills from performance by Yacov Sharir, Grimaldi Forum, Monaco, 2002 (collaboration CROMOI)
무용가의 생리정보는 위계, 겹치기, 유형학, 대칭 등을 통해 입력값으로 사용된다.
Physiological data gathered from the dancer is used as input parameter by means of hierarchy, layering, typology, symmetry.

investigation into digital design over the last decade, inspiring projects in my Zurich-based office DOCT.architects, prompting theoretical writing and discourse, and influencing my teaching at various schools such as the Architectural Association in London, the Swiss Federal Institute of Technology (ETH) in Zurich, or the Institute for Experimental Architecture at the University of Innsbruck. Based on the formal pattern of interaction between the set of input **Para** and the set of output **Var**, the design research can be differentiated into three types of investigation of increasing technical and conceptual complexity: the exploration of variation, of recursion, and of systemic interaction. (Fig 2)

Variation

In architectural design, the primary concerns must be with the arrangement of material in space, that is, the creation of spatial patterns of organisation. For this reason, geometric descriptions, and the use of geometric operations, are of major importance in any formal architectural methodology. In my design approach, my digital explorations are informed by a process of continual variation, which are in turn based upon the utilisation of a sequence of associated geometric operations. Such sequencing functions as a computable description **p** of a spatial pattern of organisation, and its application within the design process is twofold.
On the one hand, the variation of the defining parameters **in** $\in$ **Para** of the geometric relationship **p**, alerts the adaptive spatial pattern to changing local conditions, much like the case of the U-shaped sections of the components in the Bifurcated Bridge. (Fig 3) In that project, the shape of the component – defined by a sequence of geometric operation - is constantly adapting to a given position along the boundary curves and the relative position between the focal points.
On the other hand, the continuous variation of input parameters results in a spectrum, **Var**, of possible spatial patterns, facilitating an investigation into the architectural potential hidden within well-known typologies. Such an approach was utilized in the development of an urban master-plan for district 6 in Ho Chi Minh City. (Fig 4) Based upon proto-typical residential, mixed-use urban blocks and court-yard houses, two families of variations, with varying degrees of porosity and privacy, were developed. These families formed the primary building blocks for the urban proposal.

Recursion

In both of the above cases of variation, the complexity of the resulting spatial pattern of organisation is a direct consequence of the underlying sequence of geometric operations. In other words, the design is controlled immediately by the inherent logic of the function **p**. The simplest method of overcoming this principal limitation of the formal design method, is to break the linear processing of the input **in** $\in$ **Para** a by feeding back the output **out** $\in$ **Para** into

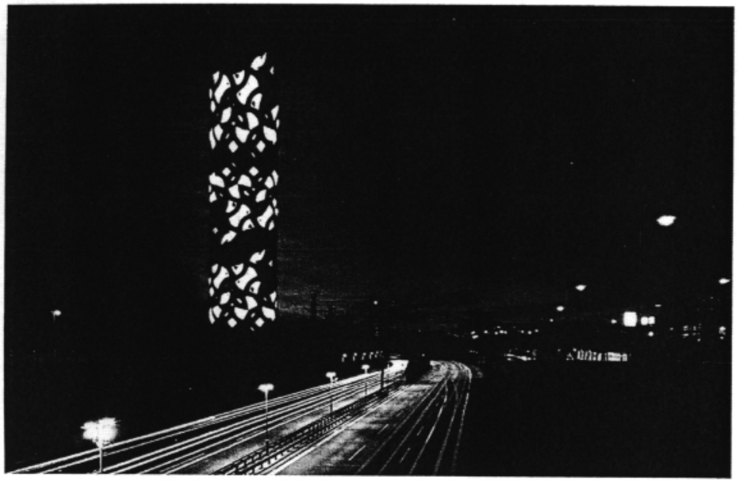


Fig 7. Candle Light Tower, Istanbul, Turkey, 2010 [invited competition]

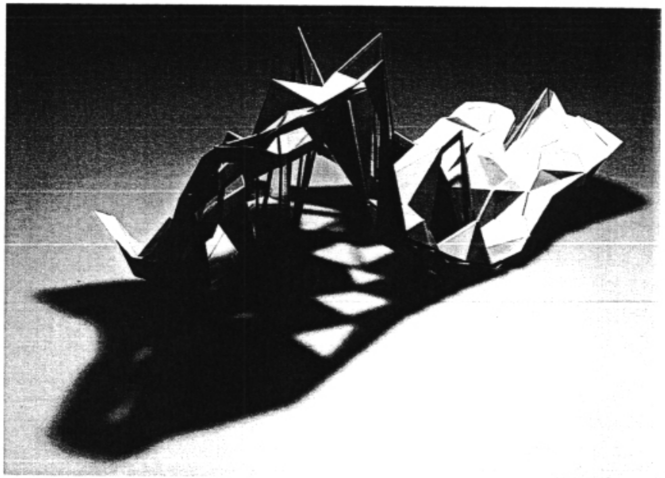


Fig 8. Orchid Show Room, Bled, Slovenia, 2009 [invited competition]

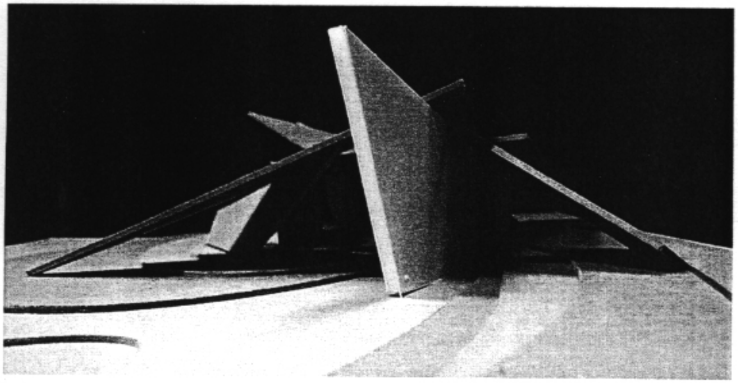


Fig 9. Visitors Center, Triglav National Park, Slovenia, 2009 [invited competition]

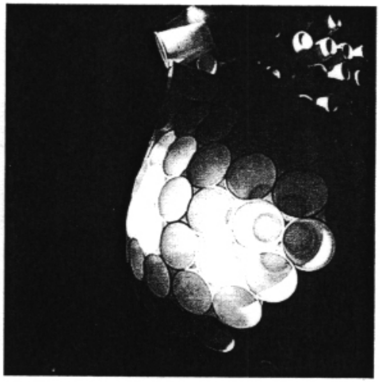


Fig 10. Covered Space Roof-Top Extension, Reutlingen, Germany, since 2010 [mock-up of preliminary design]

하중의 흐름을 연속 집결시킴으로써 상호작용으로 자율 안정화된 콘크리트 슬래브 더미를 구성하는 데 사용되었다.(Fig 9) 독일의 지붕 증축 디자인에서는, 재귀 형식이 분산 형식과 결합해 단위 개체를 차별화하는 진화 과정이 되었다. 이는 세 개의 원뿔형 기초 구조를 치환해 공간 전제 조건 · 구조 필요 조건 · 빗물 분배 · 햇빛 투과를 통합적으로 고려할 수 있었다.(Fig 10)

체계적 상호작용

이와 같은 다양한 사례에서, 건축적 · 실행적 요건은 기하학적 운영의 순차로 공식화되어 재귀 절차가 반복될 때마다 변함없이 실행된다. 이러한 작용 원리는 다양한 요건 간 상호작용의 양식을 제한한다. 함수 p의 순환적 처리 과정을 더 일반적 형태, 즉 연산 가능한 함수의 체계적 네트워크($(p_1, \cdots, p_n)$)로 분해하는 방법만이 상호작용의 더 복잡한 유형을 만들 수 있다.(Fig 2) 체계적 상호작용의 복잡한 유형을 기반으로 해야 공간의 자기조직화(self-organization) 같은 현상을 건축 디자인 형상 탐색(form-finding)의 디지털 방법으로 연구할 수 있다.

체계적 상호작용은 오를레앙(Orléans) FRAC 센터의 설치물 '빌자(Bylgja)' 프로젝트에서 처음 모델링에 사용했다. 현대 디지털 디자인 접근법은 재료, 형태, 힘을 디자인 과정에서 계속 반복해 통합하는 생성 체계(generative system)의 가능성을 충분히 보여주지 못했다. 그래서 나는 설치 디자인이 가지를 뻗는 케이블 그물에서 막 구조물의 배열이 갖는 상호작용을 탐구했다. 그물과 막 모두 형태 작동적(form-active) 장력 시스템에 속하므로, 상호의존적인 방법으로 만들어지고 최적화되고 보정될 수 있다. 조립은 과정의 결과인 위계적 분절을 드러낸다.(Fig 11) 가지를 뻗는 케이블 그물은 60개의 막 구조물을 공간에 전략적으로 분배하는 주요 시스템이다. 막 크기, 곡률, 구조물 간 거리는 각 가지의 케이블 사이 거리가 결정한다. 시스템의 위계적 분화는 빛 반사와 그림자 유형의 분화에 직접 반영된다.

빌자를 디자인할 때는 막 구조물의 행동 양식에 기존 디지털 완화 모형을 적용해 부분적 형상 탐색 과정을 간소화했다. 그러나 물질 체계의 상호작용은 아직까지 제대로 설명된 적이 없다. 나의 주요 연구 분야인 '약한 협력 체계(weak collaborative systems)'는, 적은

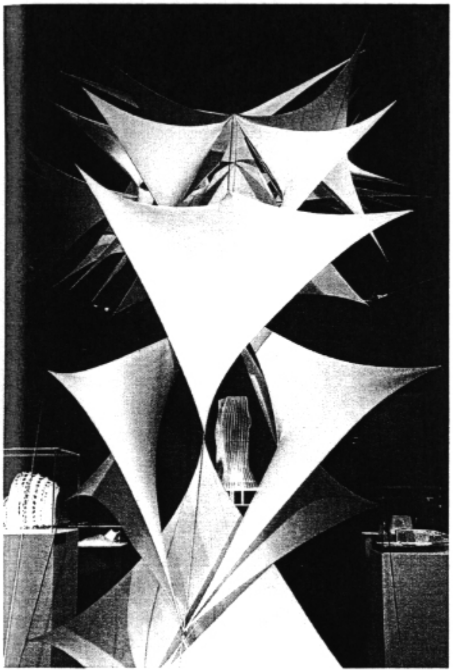


Fig 11. Bylgja, FRAC Centre, Orléans, France, 2008 (collaboration with OCEAN design research network)

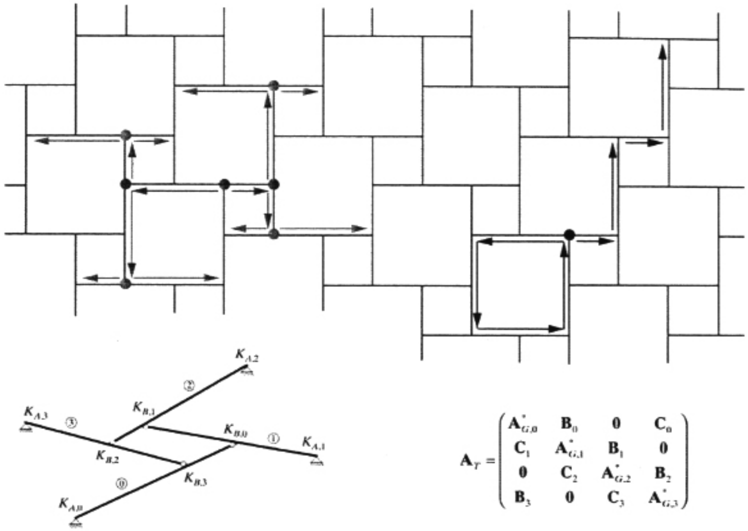


Fig 12. A reciprocal frame structure with basic element out of four beams
하중의 도식적인 분배는 세 단계의 반복을 통해 두 유형의 하중전이로 나타난다. 순환적으로 산란되는 단계의 반복적 진행은 전달행렬로 표현된다.
Schematic distribution of load over three iteration steps results in two types of load transfer. Cyclical and diffused iteration step progression is representated in the transfer matrix.

the computable functions **p**, that is, to establish a recursion. (Fig 2) The feedback transforms the static relationship **p** between **in** and **out** into a dynamic process of constant development.

In a recursive process, instated simple geometric operations can lead to spatial patterns of an unforeseen complexity. A good illustration of this phenomena is the design of Trace of History, an abstract sculpture that explores the limitations of the human perception of order, through the implementation of a simple combination of rotations and movements, operations that act as a foundation to the recursive process. (Fig 5) Furthermore, recursions are potentially adaptive processes, due to the use of constant feedback that allows for adjustments in the development of spatial patterns. This phenomena was explored in more detail in an application for an experimental dance theater. (Fig 6) A ballet dancer was hooked up with a lightweight wireless physiological monitor for measuring and recording EEG, ECG, EMG, EOG, and PSG signals. The physiological measurements gave information about the current physical state of his body, and were converted into audio-visual depictions in real-time, permitting the dancer to perform a pas de deux with his own electronic representation as a counterpart. This way a recursive adaptation process could be established with the audio-visual representation as feedback for the dancer.

The architectural potential in the phenomenon of recursion – in both its complexity and adaptability – were explored further through a series of competition entries, using cellular automata as a recursive mechanism for a proliferation of performative patterns of organisation. A cellular automaton can be understood as a computational function **p** that maps a sequence of binary values onto itself, i.e. **p**: $\{0,1\}^N \rightarrow \{0,1\}^N$ with N the number of cells in the system. In most design applications, cellular automata are used as simple discrete models for pattern formation based on regular grids, e.g. in the study of interacting cell systems in biology and medicine, or in the simulation of urban growth strategies. In the competition entries, however, the function **p** was not used to organise a spatial pattern but rather to assign a binary value to each cell as a flag in a continuously repeated quality check. Because of this, using similar rules to John Conway's famous Game of Life, the cellular automaton was able to correlate the fitness tests of neighbouring cells, resulting in growing clusters of performative neighbourhoods.

Whilst designing a high-rise block, this strategy was applied to a number of components as building blocks in order to develop a façade that became an exterior structural system, functioning at the same time as a fractal sun-shade. (Fig 7) In a second competition entry for an orchid grower's greenhouse, the cellular automaton was used to organise a differentiated roof space in such a way so the rain water was moved to specific points on the surface. The necessary amount of energy required to heat the covered space could be harvested by integrated sun collectors. (Fig 8) For the design of a visitor's center in the Slovenian mountain region, the cellular automaton approach was used a third time, in order to organise a self-stabilizing pile of enmeshed concrete slabs, by successively

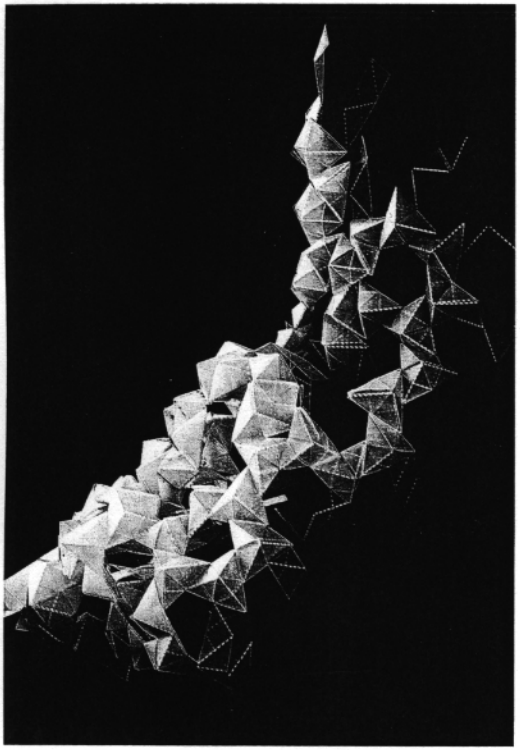


Fig 13. AA EmTech, London, 2010 (Erin Colshan, Jacob Bek, Pierluigi D'Acunto, Rony Alghadban)
세개의 엮인 띠로 정의되는구성요소는 피라미드형 조합논리를 형성해 다양한 배열, 집합, 위계를 만든다.
Defintion of basic component by weaving three strips enables a pyramidal assembly logic and the creats different types of configurations, clusters and hierarchies.

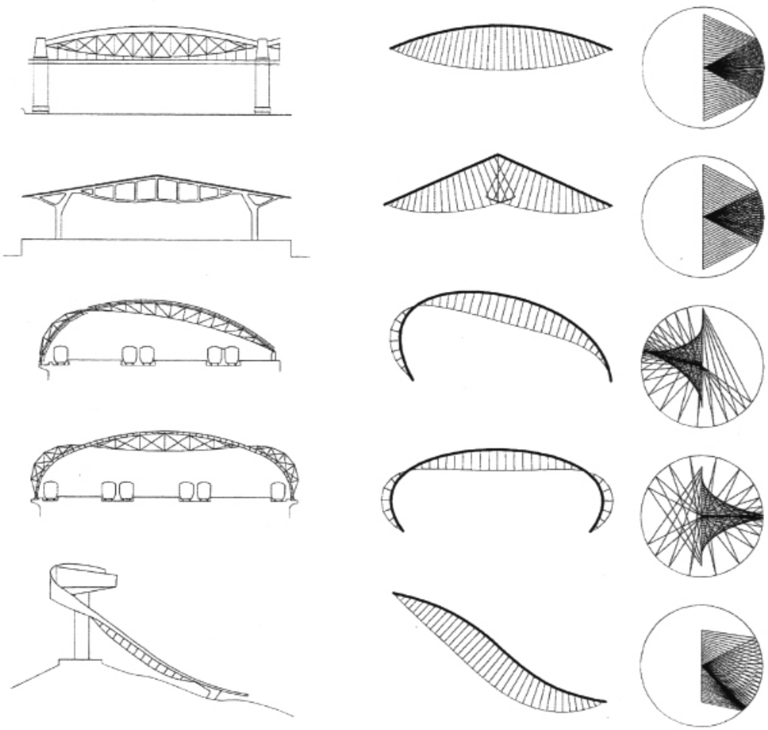


Fig 14
건물의 구조는 트러스 기하의 연속적인 현력으로 표현될 수 있다.
Built examples and possible interpretation of the building structure as constant chord force truss geometries
(from above: Luis Brunel: Royal Albert Bridge, Saltash, UK, 1859; Robert Maillart: Shed, Chiasso, CH, 1924; Grimshaw Architects: Waterloo Station, London, UK, 1993; Gerkan Marg + Partner: Lehrter Bahnhof, Berlin, Germany, 2002; Zaha Hadid Architects: Ski Jump, Innsbruck, Austria, 2001)

적재 용량을 가진 물질 요소를 집성해 인접 요소와 상호작용함으로써 큰 규모의 안정적인 공간을 구성하는 과정을 이해하는 것이다. 이러한 행동 양식은 상웅적인 것으로, 여러 짧은 막대 구조가 직조 방식으로 느슨하게 연결된 구조적 시스템으로 하중을 인접한 여러 개의 구성 요소로 분배할 수 있다.(Fig 12) 새 둥지 같은 자연의 건축물이 불연속체(discrete elements)의 구조적 시스템 사례다. 휘기(bending)와 접기(folding) 같은 기하학적 공정을 통해 다양한 디자인 스튜디오가 연구하고 있는 다른 사례도 있다. 이러한 공정을 통해 국부적인 강성도(stiffness)가 증가하고 다른 부품과 연결되기도 한다.(Fig 13)

위의 연구에서 전체 형상은 구성 요소의 국부적 상호작용에 의해 만들어진다. 체계적 행동 양상의 디지털 모델링은 연산 가능한 함수{p_1, ··· , p_n}의 집합을 사용해, 결과적 형태의 발전 과정을 상세하게 연구할 수 있게 했다. 함수 p 중 하나를 수정해서 구성 요소를 국부적으로 중재함으로써 형태의 발전을 통제하는 연구도 가능해졌다.

질료 형상 구조학(Hylomorphic Tectonics)

전통적으로 건축과 디자인을 실행하는 데 사용하는 디지털 기술에 대한 담론은 재료 담론보다 우위에 있다. 재료는 주로 형태를 위한 미적 특성이나 기술 성능 면에서 다루어져왔다. 재료의 물성은 현대 디지털 기술이나 물리적 형상 탐색 기술 과정에서 주요한 역할을 하지는 못한다. 재료는 형태를 기술하고 건설하는 데 부수적 수단일 뿐이다. 나는 디자인 초기 과정부터 구조를 통합적으로 고려하기 위해, 힘의 흐름의 논리를 이해하는 것과 디지털 도구를 발전시키는 것을 연구 중이다. 이는 도식 역학(graphic statics), 즉 형태와 힘의 상호 모수적 관계를 기반으로 한 지지 구조의 힘의 흐름을 벡터 기하학으로 표현하는 것을 중심으로 한다.(Fig 14) 그러므로 도식 역학은 형태와 지지 용량(load-bearing capacity)을 통합적으로 이해할 수 있게 한다. 지지 구조에 작용하는 힘의 형태적 효과와 목표형 제어(targeted control)를 이해하는 것이다.

생물, 무생물을 포함한 모든 물리적 존재는 중력, 풍압, 대기압 등 주위 환경이 가하는 다양한 힘에 대응해 자체 물질성을 유지해야 한다. 철학적으로, 물리적 존재의 물성은 두 개의 고유한 동시적 원칙, 즉 주요 물질 자체와 공간 속 형태의 구현이다. 두 개 원칙이 뒤얽힌 물리적 세계에서 하나는 다른 하나 없이는 발현할 수 없다. 형태 없이 물질도 없고, 물질화 없이 형태도 있을 수 없다. 비록 형상

building up load paths along touching slabs. (Fig 9) For the design of a roof extension in Germany, the formal method of recursion was also combined with the method of variation, resulting in an evolving process of cellular differentiation, enabling the combination of spatial prerequisites, structural requirements, rain water distribution and sun-light penetration through the permutation of three conical building blocks. (Fig 10)

Systemic Interaction

In all of these different applications, the architectural and performative requirements are formalised into a sequence of geometric operations, unerringly executed in each iteration of the recursion. Due to this mechanism, the pattern of interaction between the various requirements is limited. Only by breaking up the cyclic processing of the function **p** into a more general form of recursion – into a systemic network of computable functions $\{p_1,\cdots,p_n\}$ – can a more complex pattern of interaction can be achieved. (Fig 2) It is only within this more complex pattern of systemic interaction that phenomena like spatial self-organization can be explored as a digital method of form-finding for architectural design.
The first digital attempts made at the level of systemic interaction modeling were made with respect to the installation Bylgja at the FRAC Centre in Orléans. Contemporary digital design approaches have not yet taken full advantage of the possibilities offered by such a generative system, one which integrates material, form, and force as continuous iterations in the design process. That is why the design of the installation is exploring the interaction amongst arrays of membranes set within a branching cable-net. Both net and membrane belong to form-active tension systems and can thus be form-found and optimised together, calibrated in an interdependent way. The assembly displays hierarchical articulation as a result of the form-finding process. (Fig 11) The branching cable-net is the primary system that serves to distribute sixty membranes strategically in space. Size, curvature, and distance of the membranes are determined by the distance of cables in each branch. The hierarchical differentiation of the system makes it possible to yield equally differentiated effects, most particularly with regards to light reflection and shadow patterning.
In the case of the Bylgja, the form-finding for the parts of the installation was simplified due to the pre-exsiting digital relaxation models detailing the behaviours of the membranes. In general, however, descriptions observing the interplay of such material systems does not exist. Because of this, one of the major fields of research in which I am involved is the study of weak collaborative systems, attempting to understand of the process of aggregation between material components with a low-load capacity into larger stable spatial organisations, caused by the interaction of neighbouring components. An example of such behaviour is in reciprocal frames, i.e. structural systems formed by a number of short bars that are loosely connected in a weave-like manner, enabling distribution of loads into the differing neighbouring components. (Fig 12) Comparable structural systems comprised of discrete elements do occur in Nature, for example in animal architecture such as bird nests. Other examples have been explored in a number of design studios, using geometric operations like bending or folding. These operations help to increase stiffness locally and enable linking to other components. (Fig 13) In all of these studies, global form is the result of local interactions between constituent components and the digital modeling of systemic behaviour, using a set of computable functions $\{p_1,\cdots,p_n\}$. This makes it possible to investigate in more detail the development of the resultant form, and how to control it through local interventions at the elemental level of the components, through modification of one of the functions p_i.

Hylomorphic Tectonics

Traditionally, the discourses within architecture, and the digital techniques of design practice, have privileged form over material, with material rarely examined beyond its aesthetic properties or its technological capacities to act as a servant to form. Neither in contemporary digital nor in physical form-finding techniques do material properties play a major defining role in the process; material is merely a subordinate means of tracing the form and making it buildable. Because of this, part of my more recent research activity has been focused on acquiring a better understanding of the logic of force-flow, as well as on the development of digital tools in order to integrate structural considerations into the design process in the earlier stages. My research centres on and around the method of graphic statics, a vector-geometric representation of the force-flow in supportive structures that are based upon the reciprocal parametric relationship between form and force-flow. (Fig 14) Thus, graphic statics encourage a unified understanding of the interplay of form and load-bearing capacity – that is, an understanding of the formative effect of active forces within a supporting structure and the targeted control of these forces.
Every physical being, living and non-living, has to support its materiality against the various environmental forces that are imposed upon it,, such as gravity, wind or atmospheric pressure. Philosophically speaking, the materiality of physical beings can be thought of as embodiment of two intrinsic coincident principles: primary matter itself and its form, its gestalt in space. Both principles are intricately interwoven, and in the physical world one cannot occur without the other: no material is without form and no one form exists without materialization. The question of form in architecture cannot be treated independently of material, even when the strongest architectural interest is in form-finding. It is material through which forces flow, and the arrangement of material in space – the pattern of its distribution – directly influences the efficiency of the flow of forces, the direction of the flow, and its resultant intensity.
This design approach, balancing material, form, and force, has been tested in a recent series of new build projects, such as in the temporary light timber construction that functions as a sun awning over sections of the grand stairs of the architecture department of the ETH. (Fig 15) It is based upon bending behaviours under the self-weight of oversized sheets of plywood of up to 11 x 2.5 m. The design activates the material properties as the defining element in the transfer of forces. Using graphic statics, a digital model of the interplay of material, form, and forces was developed, and later compared and calibrated with the build project. The exploration of the sheet material and the manipulation of its bending properties, in controlling the number of layers of ply and the direction of the fibres within these layers, formed the starting point of the design process. The precise geometry of the bending curve emerged out of a consideration of the distribution of matter, the hierarchy within plywood as composite material, and given load conditions. Based on a systematic investigation into the defining parameters, sheets of 18 mm thickness, with fibres mainly in longitudinal direction, have been used for the pavilion. Cuts within the sheets influence the bending resistance of the sheets, enabling a larger spatial enclosure and a reduced wind-load acting upon the structure, which additionally produces a shadow pattern, flooding the stairs that are also used as seating area during summer time.

AA/ETH 파빌리온 | AA/ETH-Pavilion

AA 신진 기술공학·디자인 과정(이하 EmTech)과 취리히연방공과대학교(ETH) 구조설계 과정의 학생들이 ETH 건축학과 건물 앞 계단에 차양 기능을 하는 일시적인 경량 목재 구조물을 함께 만들었다. 이 구조물은 재료에 내재된 속성, 즉 합판이 휘어지는 성질을 이용해 공간을 창조하고 구조적이고 기능적인 요구를 결합했다.

Out of a collaboration between the Emergent Technologies and Design programme (EmTech) of the Architectural Association (AA), London, and the Chair of Structural Design at the Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, a temporary, light timber construction has emerged, functioning as elegantly poised sun shading over sections of the grand stairs situated in front of the architecture department of the ETH. Based upon the bending behaviours of sheets of plywood, the design manipulates the inherent material properties to create an arched space that integrates structural and performative requirements.

Location: Zurich, Switzerland **Project Coordinator:** Toni Kotnik **Academic Supervisors:** Toni Kotnik, Michael Weinstock, George Jeronimidis, Wolf Mangelsdorf **Competition Team:** Norman Hack, Pierluigi D'Acunto, Camila Rock De Luigi, Paula Velasco, Shibo Ren, Shanky Jain, Alkistis Karakosta **Design Team:** Norman Hack, Pierluigi D'Acunto, Camila Rock De Luigi, Paula Velasco **Project Management:** Darrick Borowski, Özgür Keles **Structural Analysis:** Pierluigi D'Acunto, Shibo Ren **Structural Consulting:** Luke Epp, Joseph Schwartz **Shading Analysis:** Yassaman Mousavi **Fabrication Team:** Fatima Nasseri, Yassaman Mousavi, Paula Velasco, Camila Rock De Luigi, Shanky Jain, Sherwood Wang, Nicolás Villegas Giorgi, Norman Hack, Pierluigi D'Acunto, Gabriel Ivorra, Sebastian Partowidjojo **Steel Work:** Peter Jenni **Wood Work:** Oliver Zgraggen & Paul Fischlin **Material:** KERTO Q LVL Standard not sanded 18mm; INOX Stranded Wire 4mm

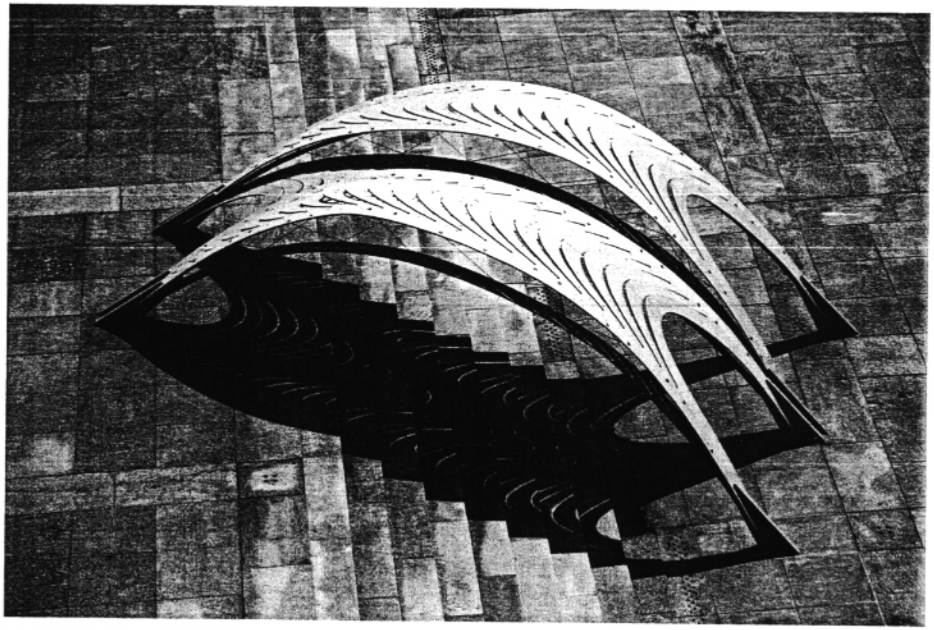


Fig 15. ETH/AA-Pavilion, Zurich, CH, 2011

탐색이 건축의 주요 논점이 되더라도, 건축의 형태가 물질을 떠나서 다루어질 수는 없다. 물질은 힘이 흐르는 매개체이며, 공간에 물질이 분배되는 유형은 힘의 흐름의 효율과 방향, 강도에 직접 영향을 주기 때문이다.

이렇게 재료, 형태, 힘의 균형이 잡힌 디자인에 접근하는 방법은 ETH 건축부 앞 계단의 부분 차양막 같은 가벼운 목재 구조물 프로젝트를 통해 실험하고 있다.(Fig 15) 이 구조물은 최대 11×2.5m의 큰 크기 합판이 자체의 무게에 의해 휘는 현상에 기반을 둔다. 디자인은 물성을 힘 이동의 결정적 요소로 활성화한다. 도식 역학을 바탕으로 재료, 형태, 힘의 상호작용을 보여주는 디지털 모델로 발전되어 지어진 결과물과 비교 후 보정되었다. 합판층 개수와 그 섬유질 방향을 조절해 판형 재료와 목재의 휘는 특성을 조작하는 것이 디자인 과정의 첫 단계였다. 휜 곡선의 정확한 기하학은 물질의 분배, 합성 재료인 합판 내부의 계층, 주어진 하중 환경에서 나타났다. 결정적 매개변수를 체계적으로 연구해, 세로 방향으로 섬유질이 있는 두께 18mm의 판을 파빌리온에 사용했다. 합판에 낸 절개는 합판의 휨 저항성에 영향을 주어 더 넓은 공간을 덮고 구조에 가해지는 풍하중을 줄인다. 여름에 사람들이 많이 앉는 계단에 그림자 유형을 만들기도 한다. 길이가 다른 판들은 다양한 휜 곡선을 생성해 인접한 판이 겹쳐지고 맞물려, 자율적으로 안정화된 아치형 구조(vault)를 만든다. 구조물에는 연속된 케이블로 이루어진 가새(cross-brace)가 설치된다. 이 케이블은 가장자리에 하중을 배분해 아치 모양의 변형을 최소화한다.

제작(Fabrication)

파빌리온 디자인에서 가장 중요한 점은 물질적 습성을 형상 탐구 과정뿐 아니라 건물 건설에도 사용할 수 있다는 것이다. 합판이 유연하기 때문에 기계 없이 인간의 힘으로 판을 구부리고 세워 조립할 수 있다.(Fig 16) 이로써 디자인 과정은 제작상 잠재적 한계에 얽매이지 않아도 된다. 일반적으로, 제작 · 조립 과정은 디자인에 영향을 주는 재료를 고찰하는 순차로 봐야 한다. 즉 체계적 상호작용 네트워크의 함수 집합 $\{p_1, \cdots, p_n\}$의 연산 가능한함수 p_i를 위한 매개변수 입력값과 같다.

실험적 강관 구조 디자인에서 절곡기(bending machine)의 한계는 오히려 디자인을 주도하기도 했다. 관을 구부리는 기술은 다양하지만 대부분의 CNC 절곡기는 회전식의 끌어당겨 굽히기(rotary draw bending) 방법을 사용한다. 이로써 관의 직경과 품질이 관의 최소 반경을 제한한다. 기계에서 관을 빼낼 수 있으려면, 굽힘 각도는 180도보다 작아야 한다. 구부러지는 부분 사이 직선 부위의 최소 길이는 클램프 길이와 같다. 관 끝의 직선 부위도 최소 길이 이상이어야 마지막 굽힘을 안정적으로 할 수 있는 압력을 확보한다. 사용한 절곡기에는 전자적으로 CNC 통제가 가능한 진행 장치(L), 회전축(R), 굽힘축(A)이 설치되어 있다. 지금까지 절곡기를 통제하는 소프트웨어에 CAD 데이터를 곧바로 불러오는 인터페이스는 없다. 요구되는 모양을 정의하는 폴리라인(컴퓨터 그래픽에서 선분들을 이어 만든 도형)의 기하 형상은 XYZ 혹은 LRA 좌표가 아니라 수동으로 입력해야 했다. 결과적으로, 기계의 기하학적 설정은 디자인의 기하학에 영향을 주고, 관계들의 네트워크$\{p_1, \cdots, p_n\}$에 맞아야 한다. 폴리라인의 실용적 분할과 이음 고려와 같은 추가 수정 사항은 네트워크에 통합되어 디자인을 제한하는 요소가 된다.

결론

프로젝트, 연구, 강의 등을 통해 나는 연산 가능성, 즉 정량화할 수 있는 개체와 기호학적 논리 구축의 관계 확립을 중심으로 작업한다.(Fig 18) 디지털은 건축적인 사고를 형식으로 만들지만 디자인의 자유를 잃는 것을 의미하지는 않는다. 반대로, 디지털은 새로운 형태의 창조물을 허용한다. 아래와 같은 이유 때문이다.

"컴퓨팅은 규정할 수 없고, 모호하고, 명확하지 않으며 뚜렷하지 않은 탐구에 관한 것이다. 이런 성향 때문에 컴퓨팅은 인간의 지능을 모방하거나 확장하려 한다. 즉 이는 합리성, 추론, 논리, 알고리즘, 연역, 귀납, 추정, 탐구, 추측에 관한 것이다. 컴퓨팅의 다면적 관계 중 몇을 꼽자면 문제 해결, 정신적 구조, 인지, 시뮬레이션, 규칙 기반

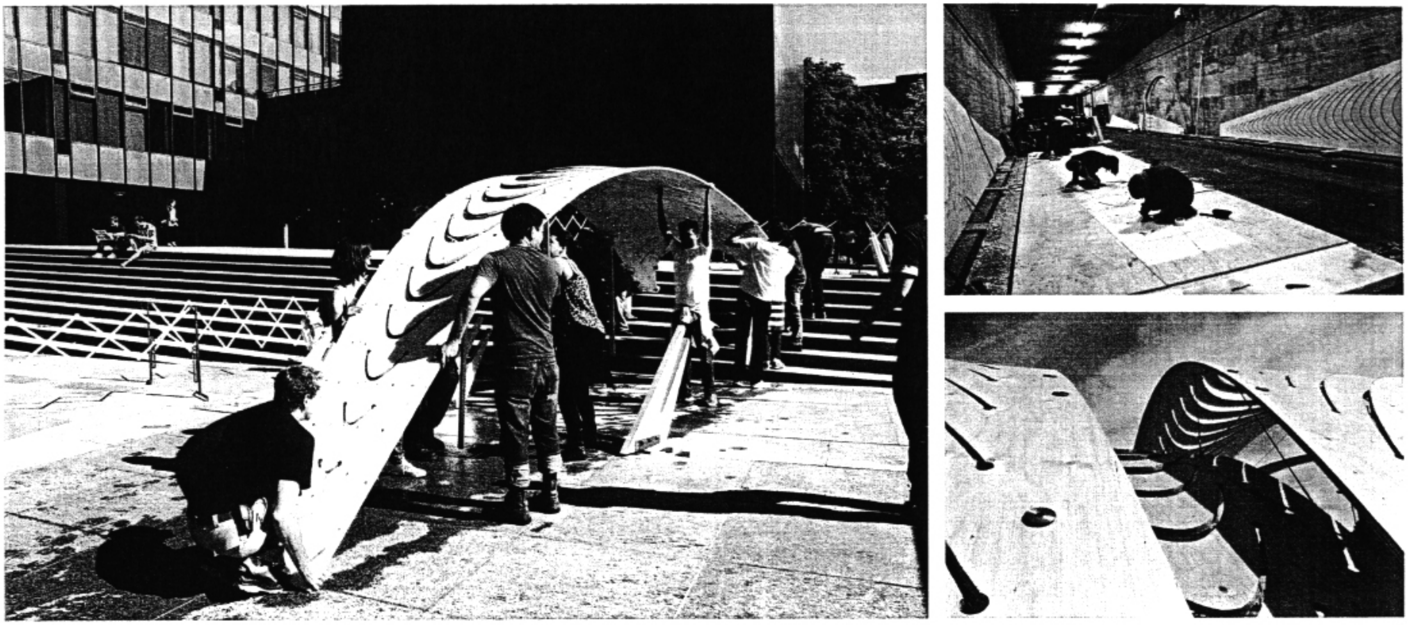
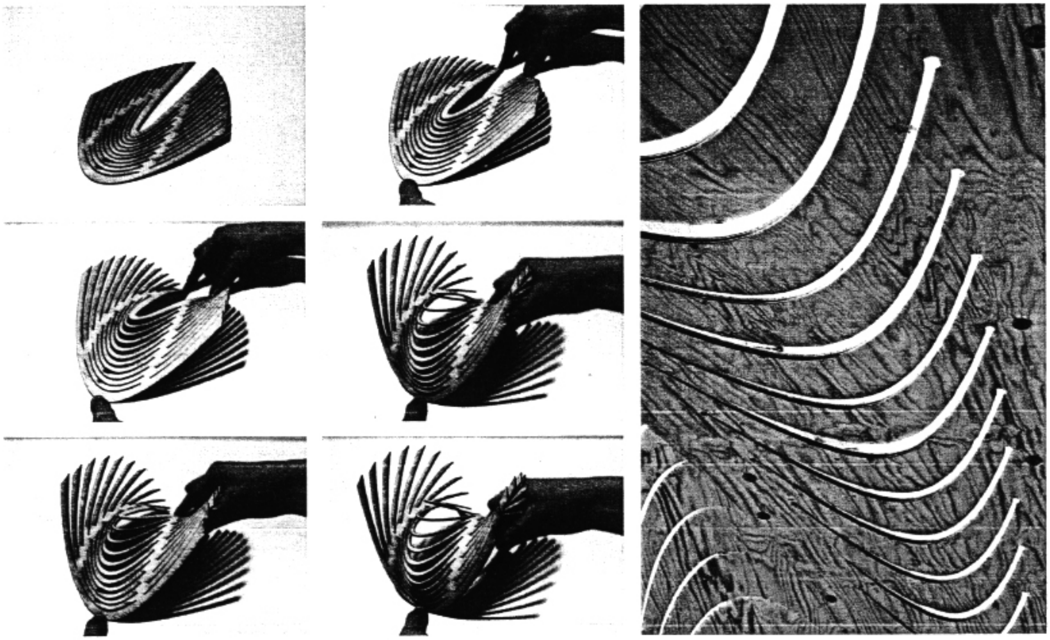
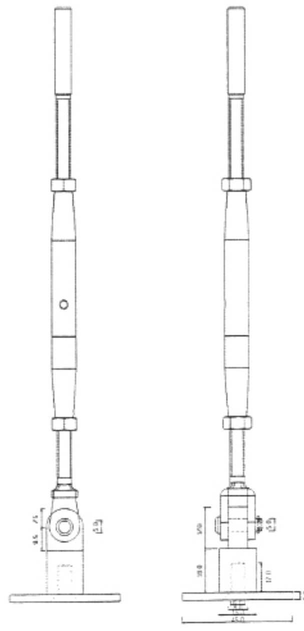


Fig 16. ETH/AA-Pavilion
Simple construction of pavilion through bending



합판에 낸 절개는 합판의 휨 저항성에 영향을 준다.
Cuts within the sheets influence the bending resistance of the sheets



Cables to cross-brace

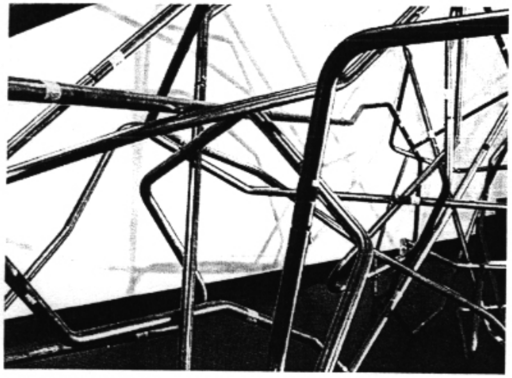


Fig 17. BEND Tube Structure, Zurich, 2006 (collaboration with MAS (ETH Zurich), Chair of CAAD)
조립이 까다로운 복잡한 엮임구조
Complex weaving of tubes in space as challenge for assembly

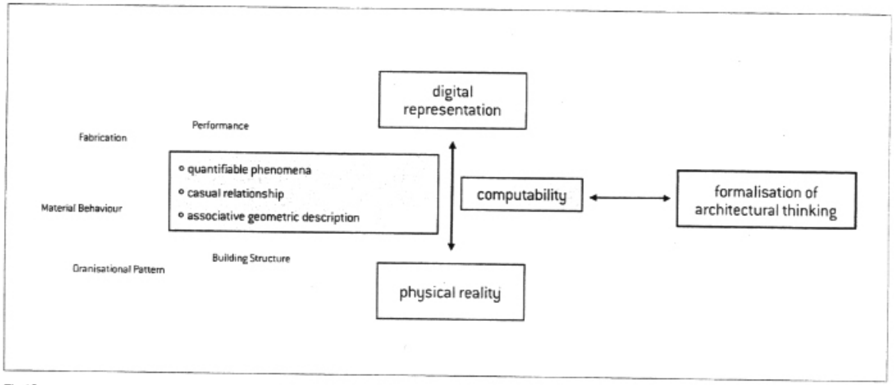


Fig 18
실체적 세계와 디지털의 매개체인 컴퓨팅의 가능성
Computability as mediating concept at the threshold between the physical and the digital

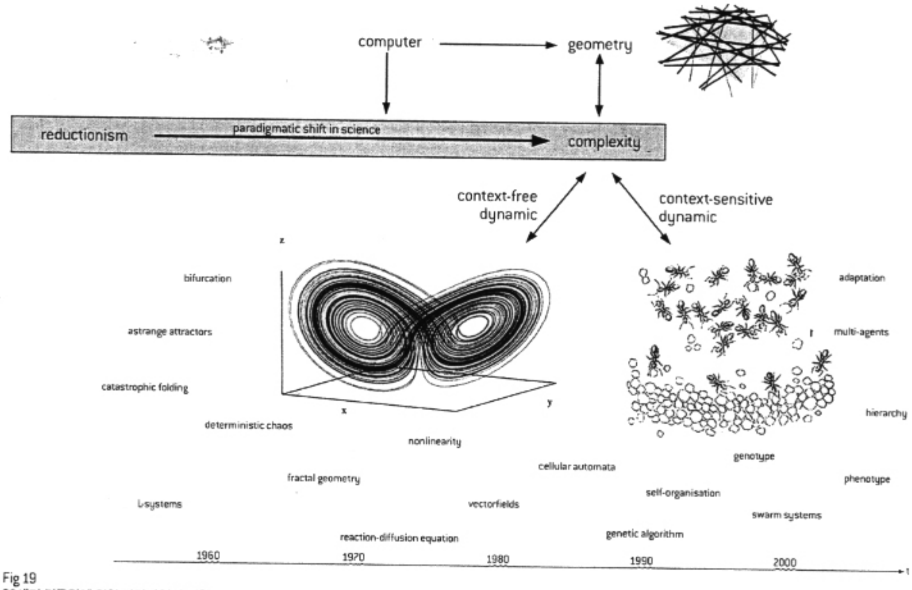


Fig 19
20세기 컴퓨팅에 의한 파라다임의 전환
Paradigmatic shift in understanding of nature over the 20th century caused by computability

지능 등이 있다."▼2

내재된 연산 가능한 함수를 인지해 디지털 디자인과 디지털이 아닌 디자인을 구분한다. 형식적 원칙을 탐구해 건축의 디자인 방법을 확장한다. 동시에 컴퓨팅은 재료의 물성에 대해 전통적 · 현상학적 해석과 다른 새로운 이해, 유물론적 관점을 "우리가 생각하는 방식을 바꾸는…지적 혁명"으로 디자인 과정에 도입한다.

컴퓨팅을 통해 건축적 사고를 재정립하는 것은 물리학과 생물학 같은 과학 분야의 변화에 필적할 만한 패러다임의 전환이라고 생각한다. 1950년대부터 자연적 과정의 시뮬레이션과 모델링의 주요 도구로 컴퓨터를 도입하면서 지배적인 연구 패러다임인 환원주의는 계속 수정되거나 대체되었다.(Fig 19) 즉 자연에 대한 기계론적 이해와 전체에서 부분으로 끊임없는 하향식(top-down) 환원법은 교체되었다. 국지적 상호작용 유형에서 전반적 시스템의 상향식(bottom-up) 특성으로서 부분의 포괄적 배열로 전환된 것이다.

컴퓨터와 소프트웨어가 새로운 구성 방법과 형태 생성 방법을 생성했기에, 건축가가 자연의 시스템적 모델에 흥미를 가지는 것은 당연해 보인다. 그 결과 지난 수십 년간 과학에서 얻은 체계적 개념은 건축 담론으로 확산되었고 현재는 디자인을 위해 연구되고 있다. 이것이 내 연구의 발판이다.

Varying the length of the sheets generates small variations in the bending curve, utilized for the overlapping and interlocking of adjacent elements, resulting in a system of self-stabilizing vaults. The vaults are cross-braced by a sequence of cables. These cables distribute all other load conditions evenly within the edge strips, and so minimize the possible deformation of the arched form.

Fabrication

One of the most important aspects of the pavilion design was the ability to pay real attention to material behavior, not only in the process of form-finding but also to take advantage of such material manipulation within the construction of the building. Due to the flexibility of the ply sheets, no machines were necessary in the assembly; simply through sheer man-power the sheet could be bent and lifted into place. (Fig 16) This meant that the design process could be freed-up from potential limitations caused in fabrication. In general, the fabrication and the assembly process has to be seen as a knotting together of all the material considerations that influence the design, i.e. as the parametric input into a computable function $\mathbf{p}_i$ within the set of functions $\{\mathbf{p}_1, \cdots, \mathbf{p}_n\}$ of the network of systemic interaction.

In designing an experimental structure out of steel pipes, even the limitations of the bending machine were instrumental, guiding the design. (Fig 17) While pipes can be bent with a variety of techniques, most CNC bending machines use the method of rotary draw bending. This, however, causes a number of restrictions: the minimum radius depends on the diameter and the quality of the tube. The bending angle must not be greater than 180 degrees, to get the tube off the machine. The minimum straight required between bends is equal to the clamp length. The last straight piece of the tube also has a certain minimum length, so the pressure may stabilize the final bending.

The bending machine used had an electronically, CNC controlled, forward drive (L), rotation axis (R), and bending axis (A). So far, however, the software controlling the bending machines has no interface for importing CAD data directly. The geometry of the polyline, that defines the desired shape, had to be inserted manually, rather than in XYZ or LRA coordinates. Consequently, the geometric setting of the machine had an immediate influence on the geometry of the design, and had to be worked into the network of relationships $\{\mathbf{p}_1, \cdots, \mathbf{p}_n\}$.

Additional modifications, such as the economic division of the polylines and the consideration of the connections, were integrated into the network, adding further restrictions to the design.

Conclusion

My work – in projects, research, and in teaching – is centered around the question of computability, in the production of causal relationships between quantifiable entities, and the construction of geometric logics. (Fig 18) The use of the digital formalizes architectural thinking, but this shift towards the formal does not mean a loss of design freedom. On the contrary, it allows for new forms of creative expression because

"computation is about the exploration of indeterminate, vague, unclear, and often ill-defined processes; because of its exploratory nature, computation aims at emulating or extending the human intellect. It is about rationalization, reasoning, logic, algorithm, deduction, induction, extrapolation, exploration, and estimation. In its manifold implications, it involves problem solving, mental structures, cognition, simulation, and rule-based intelligence, to name a few."[2]

Thus, an awareness of the underlying computational function marks the threshold between non-digital and digital design, defining an extension of design methods in architecture through this exploration of formal principles. At the same time, computability facilitates a new understanding of materiality that differs from the traditional phenomenological reading of material in architecture, introducing a materialistic view into the design process as part of the "intellectual revolution … [that] is changing the way we think".

By means of computation, a reshaping of architectural thinking has to be seen as a paradigmatic shift comparable to progressive changes in sciences like Physics or Biology. Since the 1950s, the introduction of the computer as the primary tool for simulating and modeling natural processes has resulted in a successive modification or even replacement of reductionism, as the predominant paradigm of research. (Fig 19) As such, the mechanistic understanding of nature, and the continuous top-down reduction of the whole into parts, has been transferred from patterns of local interaction into an overall global arrangement of the parts, as an emergent bottom-up property characterising the overall system. It is not surprising that architects became interested in these systemic models of nature, influenced by the related new methods of organisation and form-generation provided by computers and the appropriate software. As a result, over the past decade, systemic notions and concepts from science have diffused into architectural discourse, and are currently explored for design purposes. It is at this very point that my work is situated.

1. Bundy, A.: Computational Thinking is Pervasive, Journal of Scientific and Practical Computing, 2007, 1 (2), 67-69
2. Terzidis, K.: Algorithmic Architecture, Architectural Press, 2006, p.xi

토니 코트닉은 인스브루크 대학과 ETH 취리히에서 가르치고 있다. 그는 ETH 취리히(스위스), 튀빙겐대학교(독일), 유타대학교(미국)에서 수학과 건축을 공부했다. 그는 CROMDI(다차원정보표현연구소), 디자인 연구 현재 네트워크 OCEAN, ETH 취리히 연구원, 루체른대학교와 AA에서 교수로 활동 중이다. 그의 실무와 연구의 주제는 디지털 건축 디자인, 기하학, 재료 특성의 관계에 기반을 두고 과학 지식을 디자인 과정에 통합하는 것이다.

Toni Kotnik is assistant professor at the Institute for Experimental Architecture at the University of Innsbruck and lecturer at the chair of structural design at the ETH Zurich. He studied architecture and mathematics at ETH Zurich, CH, the University of Tübingen, D, and the University of Utah, USA, and received his doctoral degree from the University of Zurich, CH. He was research fellow at Center for the Representation of Multi-Dimensional Information (CROMDI), principal researcher at OCEAN design research network, postdoctoral researcher at the ETH Zurich, adjunct assistant professor at the University of Applied Sciences in Lucerne, CH, and studio master at the Emergent Technology and Design program at the Architectural Association in London, UK. His practice and research work has been published internationally and is centered on the integration of scientific knowledge into the design process with focus on the relationship between digital architectural design, geometry and material behaviour.