

# 프라이 오토의 '자연적 구조' 건축의 유형적 특성과 표현양태에 관한 연구

A Study on the typological characters and the expressive modalities of the architecture of 'the natural construction' of Frei Otto

이란표\* / Lee, Ran-Pyo

## Abstract

Founding himself on 'The Principle of Self-making' that is the instrument of 'the natural construction' and accomplishing the various interdisciplinary researches, Frei Otto could explicate the fundamental structure of life that is able to make visible the self-making processes in the nature, the technique and the architecture. It is the flexible pneumatic construction that is grounded on the fibrous organization. This was a milestone not only for him who wanted to put the idea of the new architectural form into practice, but also for the contemporary architecture that faces on the style-pluralistic disorientedness.

The architectural form of the natural construction includes in itself three constitutional sub-ideas. One of them is 'the adaptable architecture', which is inclined to the architecture similar to the organization of human body, and the other 'the light architecture' that is in the pursuit of the optimal form through the minimal material. The last one is 'the ecological architecture' that aims to realize the optimal dwelling environment based on the effective energy consumption by accumulating knowledges of the always fluid and unstable nature. With these architectural ideas Frei Otto could develop a new architectural form language 'the light architecture of the natural construction'.

This study is purposed to explain the various experiments that were made by his team and the basic principles of the structural dynamics of 'the architecture of the natural construction' and then to analyze the structures that were built on the ground of those principles.

키워드 : 수막 구조, 그물망구조, 천막구조, 생태건축, 경량적인 자연적 구조

Keywords : Pneumatic construction, Net construction, Pavilion construction, Ecological architecture, Light natural construction

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 목적 및 의의

'자연적 구조의 건축'이라는 거시적 건축이념을 실현하기 위해 이미 오래 전부터 생물학을 비롯하여 자연과학과 인문과학 간의 학제적 연구를 수행해 오면서 '적응력이 있고', '생태학적이며', '경량적인' 건축을 정립하고자 한 프라이 오토는 '자기형성의 원리'라는 고유한 건축원리를 발전시켰다. 이러한 '자기형성의 원리'는 20세기 중반부터 논의되기 시작한 진화론적 생물학 및 철학의 입장과 깊은 연관을 맺고 있는 원리로서 프라이 오토의 건축 미학적 근간을 이룰 뿐 아니라, 실제 건축설계에

서도 기저를 이루는 기본 원리로서 작용하고 있다. 프라이 오토의 '자연적 구조'의 건축이념에 관한 연구의 전반부를 이루는 선행논문<sup>1)</sup>에서 그러한 건축이념의 이론적 배경 및 기초 원리와 관련하여 논의된 바 있듯이, 생물학적인 구조들이 물리적이고 화학적인 토대를 가지고 있을 뿐 아니라 인간의 기술적인 구조 역시 포함하고 있다는 사실을 입증하고자 한 프라이 오토는 자연 사물들이 갖고 있는 고유한 유기적 구조를 모방하는 것에 그치는 것이 아니라 현재의 발전된 테크닉과 실험들을 거꾸로 자연 사물들에 적용시켜 생물학적인 대상들에 대한 구조적 이해에 이를 수 있었다. 결국 그는 자연적 과정과 기술적 과정에 공통으로 존재하는 자기형성과정을 가시화 시킬 가능성

\* 정회원, 배재대학교 건축학부 실내건축학과 전임강사

1)이란표, 프라이 오토의 '자연적 구조'의 건축적 이념에 관한 연구, 한국 실내디자인학회 논문집, 통권 58호, 2006

을 생명의 근원적인 구조인 '섬유조직에 기초한 유연한 수막구조'에서 발견함으로써, 이를 통해 자연과 기술의 공통근거에 기반한 건축적 구성을 주창할 수 있었던 것이다.

본 연구는 전체 연구의 전반부에 해당되는 선행논문에서 해명된 프라이 오토의 자연주의적 건축이념의 이념적 배경과 이론적인 기초에 의거하여 프라이 오토 자신이 학제적인 연구를 통해 도출해 낸 구조역학의 기본공식들과 그 스스로가 수행한 실험들과 방법들 및 이를 기반으로 실제로 구현된 건축물들을 분석하는 가운데, 보편적 형식추구를 지향하면서도 자연과 인간의 조화 속에서 자유롭고 평화로운 사회의 실현에 궁극적인 목표를 두고 있는 건축이념을 근거 규정하는 것에 목적을 두고 있다. 본 연구의 의의는 생태건축, 환경건축 등과 같은 건축경향들에 좌표를 제시해 줄 수 있는 이론적 기반을 마련할 뿐만 아니라 미래의 건축적 패러다임을 가늠해 볼 수 있도록 해주는 가능성 조건을 정립하는 것에 놓여 있다.

## 12. 연구의 범위 및 방법

프라이 오토에게 있어 '적용력 있는 건축'의 이념적 원형은 "신체기관과 같은 건축"<sup>2)</sup> 이었고, '경량적인 건축'의 목표는 최소한의 재료를 사용하여 최적의 형태를 구현하는 것이다. 반면 '생태학적 건축'은 자정능력이 있는 이상화된 자연이 아니라 항상 유동적이며 불안정한 상태에 있는 실제적 자연 상태에 대한 지식에 근거하여 효율적 에너지 사용에 기초한 최적의 주거환경을 실현하는 것에 목표를 두고 있다. '경량적인 자연적 구조의 건축'으로 한 데 모아지는 이 세 가지 건축적 특성들을 실현하기 위해 프라이 오토는 특정한 모델들과 방법들을 기반으로 다양한 실험들을 수행하였으며, 이러한 실험들의 결과들로부터 건축적 기본원리들을 추론해 낼 수 있었다.

따라서 본 연구의 범위는 프라이 오토가 자연과학 영역들과의 학제적인 연구를 통해 도출해 낸 구조역학의 공식들, 그가 수행한 실험들, 예컨대 비누 거품막 실험, 수막구조 실험, 그물망구조 실험 등과 같은 다양한 형태의 실험들의 진행과정과 이것들을 기초로 하여 얻어진 원리들을 설명하고, 이를 기반으로 구현된 실제 건축물들을 분석하여 자연적 구조의 건축이 갖는 함의를 해명하는 것에 한정된다.

이 같은 연구범위에 부합하는 접근방법은 다음과 같다. 우선 그의 건축이념이 단순한 판타지에 기초한 것이 아니라, 철저한 과학적 연구를 통해 형성되었다는 사실을 해명하기 위해 프라이 오토가 여러 책과 잡지들에서 연구결과로서 제시한 구조역학의 공식들을 설명하고나서 이러한 구조역학의 기본 전체에 근거한 실험적 방법들의 건축적 실현가능성을 제시한 후에 마

지막으로 실제 구현된 건축물들에서 자연적 구조의 건축적 원리가 얼마나 정합적으로 표현되어 있는가를 분석하는 방식으로 서술이 이루어질 것이다. 이에 따라 2장에서는 과학적 연구들을 통해 도출된 구조 역학의 기본 전체들과 생동적인 구조들을 다각도로 해명하고자 하는 프라이 오토의 고유한 실험과정들 및 이로부터 획득된 원리들에 대한 설명이 이루어질 것이며, 3장에서는 자연적 구조의 건축원리들이 실제로 적용된 건축물들을 분석하는 작업이 이루어질 것이다.

## 2. 역동적 구조의 원리와 실험적 방법들

모더니즘 건축의 형식적인 건축정전(architectural canons)에 의거하여 진행되어온 건축적 경향과 이에 대한 다각도의 저항으로서의 포스트모더니즘 건축에 대해 일정한 거리를 두면서 프라이 오토는 50년대 이래로 건축적 형식과 자연적인 구조에 내재한 공통의 생성과정에 대한 이해를 건축의 기본 입장으로 삼았으며 이를 위해 끊임없는 학제적 연구를 제기하였다. 그리하여 그는 독일 베를린과 슈투트가르트에 세워진 연구소들에서 건축학, 엔지니어 공학, 생물학, 역사학, 철학 간의 학제적 연구를 수행하면서, 단지 개별 형식들과 건축적 구조를 위한 해결 방안을 모색하는 것이 아니라, 이것들의 법칙성들과 보편적 이해를 획득하는 것에 초점을 맞춰 연구를 진행해왔던 것이다.

이 같은 노력의 한 가운데에는 이론적인 기본입장이자 건축이념으로서 '자연적 구조'라는 개념이 위치해 있으며, 이러한 '자연적 구조'의 건축을 추동하는 기본 원리가 바로 '자기형성의 원리'이다. 인위적인 작용이 개입되지 않은 채 스스로 형상화되는 모든 물질적 대상들의 기본원리인 자기형성의 원리에 기초하여 프라이 오토는 자연과 기술 그리고 건축에서 공통적으로 추론될 수 있는 '형상화 과정'을 탐구하여 이로부터 "가벼우면서도 자연적이며 적응능력이 있는 동시에 변경가능한 건축의 새로운 형식"을 발전시키고자 하였던 것이다.

### 2.1. 구조 역학의 기본전제

적용력있고 경량적이며 생태학적인 자연적 구조의 건축이념이 구상되기 시작했던 때부터 이미 프라이 오토는 형태와 힘 그리고 질량 등과 같은 물리적인 기초개념들과 씨름하면서 경량건축의 원리를 수립하기 위한 과학적인 토대를 마련하는데 주력하였다. 그에 의해 수행된 실험들과 건축물들이 일견 상상력의 산물로 여겨지지만 사실 그 이면에는 과학적이고 체계적인 물리학적인 토대가 자리잡고 있었던 것이다. 따라서 자연적 구조의 건축을 실현시키기 위해 그가 수행한 실험적인 방법들과 이를 토대로 한 건축을 이해하기 위해서는 구조역학의 기본전제들에 대한 이해가 필수적이라 하겠다.

2) Otto, Frei, *Anfassungsfähig Bauen*, in: IL(Institut für leichte Flächentragwerke an der Universität Stuttgart) 14, Karl Krämer Verlag, Stuttgart 1974, p.14

### (1) 힘과 질량

현대 물리학에서 자연에 존재하는 네 가지 기본적인 힘으로 규정되고 있는 ‘중력 gravitation’, ‘전자기력 electromagnetic force’, ‘약 핵력 weak nuclear force’, ‘강 핵력 strong nuclear force’ 중에서 움직이지 않는 구조물들에 작용하고 있는 힘은 오직 중력뿐이다. 중력은 두 개 이상의 여러 물체들 사이에서 서로 끌어당기는 상호작용의 형태로 나타나며, 사물들에 형태를 부여하는 것이다. 프라이 오토 역시 중력이 가지는 고유한 특성에 주목하여 다음과 같이 주장한다. “힘들은 모든 대상 표면과 내부 곳곳에 존재한다. 심지어 힘들은 무(無)를 관류하기 까지 한다. 힘들은 대상들을 형태화시키며 한 데 모아놓기도 할 뿐 아니라 파괴시키기도 한다. 힘들은 원자들과 분자들, 그리고 가스 및 액체 및 고체들 속에서 작용한다”<sup>3)</sup>. 즉 힘 자체가 아니라 힘의 작용만이 눈에 보이는 것이며, 대상에 작용하는 힘의 정도에 따라 대상의 형태가 결정지어지는 것이다. 그러나 우리가 살고 있는 공간에서 힘의 변화에 의한 형태변화는 거의 감지하기 힘들 정도로 미미하다.

프라이 오토는 이러한 형태변화를 입증하기 위해 외적인 힘과 내적인 힘을 구분하면서 약기 하프에 작용하는 힘에 주목한다. 물리적 물체로서 하프는 바닥에 외적인 하중을 가하며, ‘작용=반작용’의 원리에 따라 바닥으로부터 동일한 힘이 내적인 힘으로서 반작용하는 것이다. 물론 하프의 틀 내에는 바닥으로 전해지지 않는 또 다른 내적인 힘들이 존재하고 있기는 하다. 하프의 현들과 틀 사이에는 일정한 견인력이 작용하고 있는 것이다. 이러한 견인력들은 내적인 힘들로서 하프가 바닥에 놓여 있건 아니면 무중력 상태의 우주공간에 있건 간에 독자적으로 존재하고 있는 힘으로서, 외부로 전달되지 않는다. 왜냐하면 내적인 힘들은 현들 가운데 존재하는 견인력들과 동일하게 존재하기 때문이다.

프라이 오토는 이러한 외적인 힘과 내적인 힘에 유비적인 관계로서 ‘하중’과 ‘내력’을 예로 든다. 그에 따르면, “외적인 하중이 가해지는 경우 내부에는 외적인 힘들에 저항하는 힘들이 작용하는데, 이러한 내력은 하중에 반작용하는 힘으로서 하중과 동일한 크기를 갖는다”<sup>4)</sup>. 즉 사물들 내부에서 하중은 재료의 저항을 야기시키는 것이다. 예컨대 건물의 경우 하중은 이른바 사물의 질량에 의해 야기되는 바, 100kg의 질량을 가진 물체는 약 1kN에 해당되는 하중을 지표면에 가한다고 할 수 있다. 이를 통해 물체는 초원위에 놓여 있건 건물 내부에 있건 이와는 무관하게 돌체가 위치한 바닥에 하중을 주게 되는 것이

다. 그리고 이와 동시에 물체의 하중은 건물의 구조에 의해 바닥으로 전달됨으로써, 건물구조는 저항을 받게 되는 것이다.

### (2) 재료와 견고성

건물의 구조를 구성하는 재료들은 각각의 고유성에 따라, 예를 들면 질량과 부피 사이의 관계에 따라 구별된다. 이 때 건물 구조에 있어 중요한 기준이 바로 견고성이다. 그러나 견고성이라는 것은 그렇게 명확히 규정될 수 없다. 프라이 오토에 따르면, “재료의 견고성은 절대 측정될 수 없다. 아니, 정확히 말해 물질의 견고성이란 존재하지 않는다. 우리는 표준화된 기구를 가지고 표준화된 형태의 물체에 하중을 줄 수 있을 뿐이다”<sup>5)</sup>. 예컨대 우리는 통상적으로 시멘트가 텍스타일보다 더 견고하다고 말할 수 있지만, 아라미드 섬유소가 시멘트보다 백배 이상 더 강력한 견인력을 지닌다는 사실로 볼 때, 물체의 독자적인 견고성을 말하는 것은 어려운 일이라고 할 수 있다.

그럼에도 불구하고 두 가지 사항이 고려된다면, 일정한 측정 기준이 얻어질 수 있다. 첫째, 단축 하중과 다축 하중이 구별될 수 있을 것이다. 단축 하중의 경우, 재료의 내부 견인력의 한계를 벗어난다면, 곧바로 무너지게 된다. 그러나 건축물에서 이러한 측정치는 매우 중요한데, 그 이유는 모든 측면에서 동일하게 작용하는 압력은 거의 나타나지 않기 때문이다. 이와 더불어 두 번째로 고려될 사항은 압력 지지대에서 나타나는 꺾임의 문제이다. 왜냐하면 재료의 견고성이 한계에 이르게 되면, 지지대는 형태변화를 일으켜 꺾이게 되기 때문이다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 프라이 오토는 여러 과정을 거치면서 ‘허용치 장력’의 공식을 도출해 낸다. 그에 따르면, “장력은 일정한 단면에서 작용하는 힘을 나타낸다. 따라서 장력은  $N/cm^2$ 에 따라 측정된다”<sup>6)</sup>. 이를 일반화시켜 보자면,

$$\text{‘장력 } \sigma = F/A \text{’}$$

로 표시될 수 있다.

### (3) 형태

측정 불가능한 것으로 보이는 것에 대해 최대한 측정 가능한 척도를 마련하고자 한 프라이 오토에게 구조 개념 역시 물리적인 의미를 가진다. 그에 따르면, “구조란 여기서 사용된 개념규정에 따르면 일정하게 떨어져 있는 거리들을 통하여 힘들을 전달할 수 있는 물질적 대상들이라고 할 수 있다”<sup>7)</sup>. 다시 말해 일정하게 유지되는 하중과 이러한 하중이 내맡겨져 있는 가변적 하중을 바닥으로 전달하는 것이 구조에 대한 일차적 규정인 것이다. 그러나 견고성의 규정과 마찬가지로 여기서도 구조적 적합성을 측정할 수 있는 체계가 존재하지 않았기 때문에 프라이 오토는 그러한 체계를 수립하기 위해 형태의 문제에 몰두하였다.

3)Otto, Frei, Kräfte, die Objekte bilden, in: IL(Institut für leichte Flächentragwerke an der Universität Stuttgart) 23, Karl Krämer Verlag, Stuttgart 1992, p.42

4)Otto, Frei, Belastung, in: IL(Institut für leichte Flächentragwerke an der Universität Stuttgart) 24, Karl Krämer Verlag, Stuttgart 1998, p. 21

5)Otto, Frei, Festigkeit, in: IL 24, p.28

6)Otto, Frei, Spannung, in: IL 24, p.25

7)Otto, Frei, Kraftweg, TRA und BIC, in: IL 23, p.54

그는 인간이 수 천년동안 다양한 구조물들과 건물들을 건립해왔지만 항상 보편적으로 유용한 목적을 위해서만 최적의 형태를 발견해온 것은 아니라는 사실에 착안하여, 재료와는 무관하게 순전히 지탱능력과 연관된 형태들을 찾아내고자 하였다. 이러한 형태연구의 기저에는 그의 경량구조의 이념이 자리 잡고 있다. 그에 따르면, “상대적으로 작은 질량으로 커다란 힘을 전달하는 대상들은 ‘경량’의 대상이라고 할 수 있다. 즉 그것들은 기술적으로 말하자면, ‘경량구조들’이다. 그러나 만일 우리가 ‘담이나 다리 혹은 지붕처럼 건축소재가 최적의 상태로 사용되는 구조물들의 형태란 알려져 있지 않다’는 사실을 확증한다면, 보통 사람들만이 아니라 수많은 엔지니어들조차 놀라움을 금치 못할 것이다”<sup>8)</sup>. 사실상 완전한 의미의 경량구조의 형태란 존재하지 않지만, 그것으로 향한 최대한의 추구는 가능할 수 있기에 프라이 오토는 일정한 기준을 마련하고자 하였다. 압력과 구부러짐에 견딜 수 있는 건축소재들에 대해 중요한 형식적 기준으로서 정립된 기준인 ‘세장(細長, slenderness)’가 바로 그것이다. 예컨대 한 대상의 높이와 넓이 사이의 관계는 기하학적인 세장을 통해 기술될 수 있다. 기하적인 세장은 하중과 무관하기 때문에, 프라이 오토는 다음과 같은 세장의 공식을 도출해낼 수 있었다:

$$\text{‘상대적인 구조적 세장 } \lambda = s/\sqrt{F}$$

즉 힘의 전달거리  $s$ 를 루트  $F$ (힘)로 나눈 것이 세장이라는 것이다. 여기서 프라이 오토가 힘의 전달거리를 루트  $F$ 로 나눈 이유는 구조물의 허용 하중이 단면, 즉 이차원적 가치에 의존하는 반면, 힘의 전달거리는 일차원적 가치만을 나타내기 때문이다. 이를 통해 그는 상대적인 구조적 세장이 대상의 절대적 크기와는 무관하다는 결론에 이르렀다. 그리하여 위의 공식을 통해 해명되는 사실은 대상이 하중을 견딜 수 있는 힘의 전달거리가 길면 길수록 대상은 더욱 더 가늘어지고( $\lambda$ 가 커지고), 대상이 지지하는 하중이 커지면 커질수록 대상은 더욱 두터워진다는 것이다.

#### (4) 하중도

프라이 오토는 하중을 지탱하는 부분들을 하중전달 장치로 간주함으로써, 하중을 지탱하는 부분의 효율성이 하중전달 도정을 분석하는 것과 유사하게 측정되어야 한다는 결론에 이르게 되었다. 그의 생각에 따르면, 가장 짧은 도정이 가장 효율적이라는 것이다. 그는 그때그때의 저항력  $F$ 와 하중출발지점으로부터 하중지탱지점까지의 거리를 곱함으로써 하중도가 도출될 수 있다고 하면서 다음과 같은 하중도 공식을 정립한다:

$$\text{‘Tra} = F \cdot s$$

이러한 하중도 ‘Tra’는 사물이 힘을 전달할 수 있는 능력을 나타내주는 일반적인 척도이기는 하지만 견고성의 경우처럼 단일

하게 정의될 수 없는 기준이다. 따라서 프라이 오토는 “최대한의 하중도”, “형태변화 하중도”, “실제 사용 하중도”<sup>9)</sup> 등과 같은 개념들을 동원하여 하중도 개념을 정교화 시키고자 하였다.

또한 그는 구조물들의 형태들을 분류할 목적으로도 하중도 개념을 사용하는데, 예를 들면 평평한 ‘중간설주(Stabwerke)’의 외부하중도와 내부하중도 간의 관계를 통해 ‘하중도 지수 (Tr =  $T_i/T_a$ )’를 규정함으로써 여기서 얻어진 수치에 의거하여 다양한 시스템들의 하중능력들을 비교할 수 있게 된다. 예컨대 내부하중도를 외부하중도로 나눈 값인  $Tr$ 이 작으면 작을수록 형태는 보다 나아지는 것이다. 결국 내부하중도  $T_i$ 는 모든 내부저항력들과 이것들의 전달도정들의 산물이며, 외부하중도  $T_a$ 는 모든 외부 하중들과 지탱기반으로부터 떨어진 거리들의 산물이라고 할 수 있다.

#### (5) 질량소모도

상대적인 구조적  $\lambda$ 와 하중도  $Tra$ 와 더불어 프라이 오토는 다양한 구조물들의 형태들을 서로 비교할 수 있는 기준치들을 발견하였다. 그러나  $\lambda$ 와  $Tra$ 는 경량건축에 있어 결정적인 것이라고 할 수 있는 구조물의 질량  $m$ 에 대해서는 아무 것도 말해주지 못하는 문제를 지니고 있다. 이 같은 이유 때문에 그는 소위 ‘구조효율성측정치’라고 불리우는 공식을 마련하고자 하였다. 그는 자신의 통계학 스승이었던 ‘헬무트 비켄바흐(Hellmuth Bickenbach)’의 이름을 따서 그러한 측정치를 ‘Bic’라고 불렀다. 한 구조물의 질량  $m$ 과 지탱기반으로 하중을 전달할 수 있는 능력 간의 관계, 혹은 질량  $m$ 과 대상의 하중도  $Tra$  간의 관계로 정의될 수 있으며 ‘ $Bic = m/Tra$ ’라는 공식으로 나타내어질 수 있는 ‘구조효율성측정치’에 대해 그는 다음과 같이 설명한다: “Bic은 물리적 크기이다. Bic이 작으면, 대상은 상대적으로 가볍게 된다. 따라서 낮은 Bic 수치는 경량건축을 나타내주는 수치라고 할 수 있다”<sup>10)</sup>.

프라이 오토는 교량이나 건물과 같은 거대한 구조물로부터 아주 작은 원자나 결정체에 이르기까지 수많은 대상들의 Bic 측정치를 계산하였으며, 하중도를 다양하게 규정하였듯이 Bic 수치에 대해서도 “정상하중 Bic 또는 한계하중 Bic”이라든가 “실제사용하중 Bic”, “형태변화 Bic”, “에너지 Bic” 등과 같이 정교한 개념규정을 하고자 하였다.

이상에서 설명된 다섯 가지 구조역학의 기본 조건들을 도표화 시켜보자면 다음과 같이 나타내질 수 있을 것이다.

8)Otto, Frei, Vorwort, in: IL(Institut für leichte Flächentragwerke an der Universität Stuttgart) 21, Karl Krämer Verlag, Stuttgart 1979, p.4

9)Otto, Frei, Belastung, in: IL 24, 1996, p.43

10)Ibid., p.47

<표 1> 구조역학의 기본공식

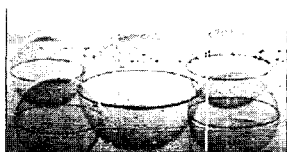
	공식	내용
장력	$\sigma = F/A$	일정 단면에서 작용하는 힘. $N/cm^2$ 에 따라 측정
구조적 세장	$\lambda = s/\sqrt{F}$	힘의 전달거리 $s$ 를 루트 $F$ (힘)로 나눈 것
하중도	$Tra = F \cdot s$	저항력 $F$ 와 하중출발지점으로부터 하중지점까지의 거리를 곱한 치수
구조효율도	$Bic = m/Tra$	구조물의 질량 $m$ 과 지탱기반으로 하중을 전달할 수 있는 능력 간의 관계, 혹은 질량 $m$ 과 대상의 하중도 $Tra$ 간의 관계

## 2.2. 자연적 구조형태를 발견하기 위한 실험적 방법들

프라이 오토는 경량구조의 형태가 “고유한 질량의 축소원리”에 따르는 ... 발전 및 최적화 과정들의 결과”<sup>11)</sup>라고 하면서 경량대상들의 자기형성과정들에 주목하였다. 이러한 자기형성과정들을 기술적으로 정교화하기 위해 그는 다양한 실험들을 수행하였다. 본 논문에서는 그 중에서 건축물의 설계에 직접 적용된 주요한 실험들을 중심으로 설명해보기로 하겠다.

### (1) 비누 거품막 실험

비누 거품막 실험은 얇은 철사나 실로 틀을 만들어 이 틀을 비눗물에 담궜다가 다시 꺼냈을 때 생겨나는 비누 거품막의 형태를 대상으로 삼는다. 비누 거품막의 형태는 틀의 형태에 따라 상이하게 형성된다. 평평한 틀에 생긴한 틀에 맺힌 비누 거품막은 말안장 모양으로 구부러져 형성된다. 실험을 통해 밝혀진 사실은 비누 거품막이 항상 최소한도로 가능한 표면위에 형성된다는 것이다. 이렇게 형성된 비누 거품막은 물리적으로나 수학적으로 명확히 정의되는 ‘최소면(Minimalfläche)’의 형태를 의미하는 바, 최소면을 가진 비누 거품막 내에서는 어느 곳이나 동일한 장력이 유지되는 것이다.



<그림 1> 비누 거품막 실험



<그림 2> 비누 거품막 실험을 기초로 설계된 전시관 Penta-dome, 1958

프라이 오토는 이러한 실험의 결과를 천막구조건축에 적용시키고자 하였다. 그는 천막의 표면에서 장력이 최적의 상태로 골고루 분산되도록 하기 위해 ‘비누 거품막 기계’를 이용한 실험에서 얻어진 결과들을 모델로 만들어 최적의 천막구조를 설계하고자 하였던 것이다<sup>12)</sup>. 비누 거품막 실험의 장점은 다양한 실험들을 통해 수없이 많은 최적화 형태들을 얻어낼 수 있다는

것이며, 비누 거품막 기계 내에 장착된 카메라를 통해 정교한 모델을 만들어 실제로 구현해낼 수 있다는 것이다.

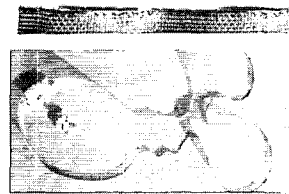
11)Otto, Frei, Einführung, in: IL 24, 1996, p.11

12)Otto, Frei und Rasch, Bodo: Gestalt finden : auf dem Weg zu einer Baukunst des Minimalen, Ed. Menges, Stuttgart 1995. p.59

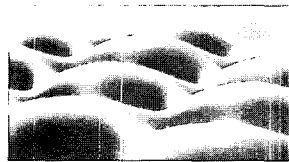
것이며, 비누 거품막 기계 내에 장착된 카메라를 통해 정교한 모델을 만들어 실제로 구현해낼 수 있다는 것이다.

### (2) 수막구조 실험

수막구조 실험은 두 개의 나무판 가운데를 원하는 모양으로 자른 후 그 사이에 PVC나 아크릴로 된 얇은 판을 끼워 넣고



<그림 3> 아크릴에 공기압을 불어 넣어 만든 수막구조



<그림 4> 깁스모델

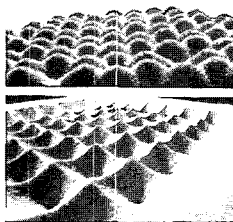
조가 생겨나는 것이다.

이 판을 공기구멍이 있는 기본 판에 살짝 접촉시킨 후 이곳에 공기압을 가하여 부풀어 오르게 함으로써 굴곡진 공간을 생겨나게 하는 실험이다.

### (3) 모래용출실험

이와 유사한 방법으로서 깁스모델이 있다. 얇은 고무판을 원하는 모양의 틀로 밑으로 늘여지게 한 후, 윗 판에 구멍을 뚫어 깁스용액을 붓고서 45분 정도를 기다렸다가 굳어진 깁스모델을 꺼내면 비누 거품막 구조처럼 모든 방향에서 동일한 장력을 갖는 굴곡진 막 구조가 생겨나는 것이다.

결국 돔 형태의 구조물 설계에 적합한 이러한 수막 구조는 건물의 형태를 자유로이 굴곡지게 만들 수 있을 뿐 아니라, 재료를 남김없이 사용할 수 있다는 이점을 가지고 있는 것이다<sup>13)</sup>.



<그림 5> 원추모양과 깔대기 모양의 모래용출 실험

화산이나 산비탈의 자갈더미 혹은 광산의 폐석더미의 형태는 서로 일정한 유사성을 지니고 있다. 즉 그것들은 모두 원추형의 용출형태를 갖고 있는 것이다. 따라서 방벽, 제방, 방파제, 철로의 둑과 같은 구조물이 건설되어야 할 경우에, 용출물의 자기형성과정에 관한 지식은 필수적인 전제가 된다.

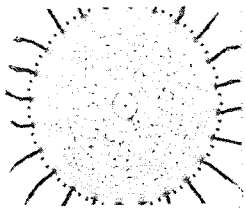
용출물의 자기형성과정은 모래와 같이 작은 재료의 소재들이 한 지점으로부터 떨어질 경우, 바닥에 동일한 경사각을 갖는 원추모양의 더미를 형성하는 과정을 통해 일반적으로 묘사될 수 있다. 실험소재로는 모래만이 아니라 잘게 부서진 자갈, 소금 및 설탕 등이 사용될 수 있다. 우선 원통 형태의 플라스틱통에 모래를 가득 채우고 가운데 구멍을 내면, 원통안의 모래모양은 점점 깔때기 모양이 되고 구멍을 통해 밑으로 떨어지는 모래더미는 원추모양이 된다. 그리고 나서 바닥에 형성된 원추모양의 더미를 바치고 있는 바닥판을 흔들여주

13)Ibid., p.61

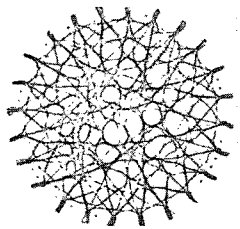
거나 기울이게 되면, 보다 안정적인 경사각을 지니는 원추 더미가 형성된다. 이 같은 모래용출실험은 지각변동에 민감한 구조물들을 건설할 때만이 아니라 자연지형을 이용한 설치예술을 구상할 때에도 매우 유용한 길잡이가 될 수 있다<sup>14)</sup>.

#### (4) 그물망 실험

출발지점과 목표지점이 직선으로 연결되어 있는 직선네트구조는 실이나 고무줄과 같은 재료들을 통해 쉽게 모델화 시킬 수 있다. 효율적 이동량의 측면에서 볼 때 이러한 직선네트구조는 최적의 구조라고 할 수 있다<sup>15)</sup>. 그러나 전체 도정의 길이와 점유되는 면적은 매우 크다. 따라서 인도나 차도 혹은 철도나 고속도로 등과 같은 교통로를 건설할 때 드는 비용과 면적사용을 고려해 볼 때 직선네트구조와는 다른 최적화 구조를 개발할 필요가 있는 것이다.



<그림 6> 직선네트구조



<그림 7> 최적의 그물망 구조

프라이 오토는 이를 위해 다음과 같은 그물망 실험을 고안하여 실행하였다. 그는 우선 실들을 양쪽으로 잡아 당겨 팽팽하게 한 후 원래 길이보다 8% 정도 더 늘려 잡아 물에 적신다. 그렇게 되면 실들은 물의 표면장력을 통해 다발을 형성하게 된다. 이렇게 형성된 다발모양에서 뒤로 제척진 통행로들은 직선네트구조에서보다 8% 더 길지만, 차지하는 면적은 직선네트구조의 30 - 50% 수준에 이를 뿐이다. 이처럼 최소한으로만 우회하는 네트구조는 새로운 의미의 최적화 구조에 가장 부합되는 구조라고 할 수 있는 것이다.

### 3. 자연적 구조의 건축적 특성

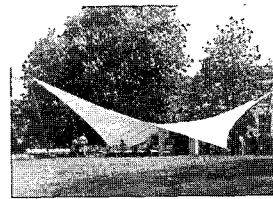
#### 3.1. 천막구조 건축

인류가 이루어온 건축구조 중 가장 오래된 구조들 중의 하나인 천막은 다양한 문화권에서 거주공간이자 특정목적에 위한 공간으로 사용되어 왔으며, 사용재료와 기후환경 그리고 사회 구조에 따라 상이한 형태를 띠었다.

압력을 지탱해주는 지지대와 장력을 유지시켜주는 막의 구조로 이루어져 있는 천막구조는 1950년대에 프라이 오토에 의해 획기적인 건축구조로 자리 잡게 된다. 그는 무엇보다 형태와 구조 사이의 연관을 연구하는 과정에서 자기형성적으로 생

겨나는 '최적의 최소면'이 갖는 의미를 발견하였던 것이다. 그가 발견해낸 최소면이란 말안장 형태로 굽은 형상으로서 모든 방향으로 동일한 장력을 지니는 구조를 말한다. 앞서 언급된 바 있듯이, 이러한 구조를 얻어 내기위해 그는 비누 거품막 기계를 이용하여 모든 방향으로 동일한 장력을 지니는 비누 거품막의 구조를 모델화 시켰다. 이러한 모델을 근거로 그가 설계한 천막구조로는 대략 네 가지 유형이 있다.

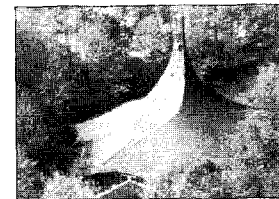
첫 번째 유형은 천막구조의 기본형인 '사점구조 천막(Vierpunktzelt)'이다. 두 개의 고 지점과 두 개의 저 지점 사이에 말안장 모양의 천막이 팽팽하게 드리워진 구조로서, 실 길이의 조정을 통한 장력의 변화로 기하학적인 형태가 스스로 형성되는 것이다. '사점구조 천막'은



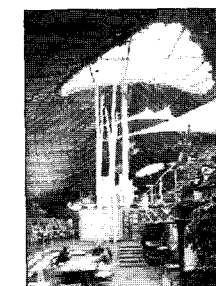
<그림 8> 사점구조 천막, 카셀, 1955

자연적 구조의 자기형성과정을 가장 추상화된 형태로 표현하고 있는 천막구조라고 할 수 있다. 프라이 오토가 처음 천막구조물을 설계했을 때 사용한 구조가 바로 '사점구조 천막'이며, 1955년 독일 카셀에서 개최된 독일정원 박람회에 건립된 음악회장 설계에 이 구조가 사용되었다.

두 번째 유형은 '침두구조 천막(Spitzzelt)'으로서, 팽팽하게 드리워진 천막 내의 한 지점에 세워진 기둥을 통해 지탱된다. 이러한 구조에서는 천막의 모든 방향으로 힘들이 고루 분산되기 위해 자일 홈, 궁륭형태의 자일, 자일 매듭과 같은 다양한 기체들이 사용된다. 자일 매듭부분들은 비



<그림 9> 경량건축연구소, 슈투트가르트, 1967



<그림 10> 경량건축연구소 내부, 1967

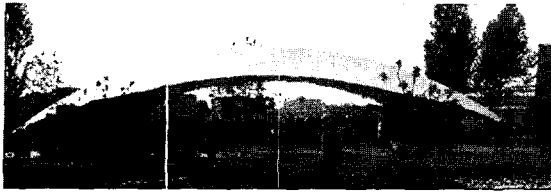
누 거품막 실험을 통해 얻어진 모델에 근거하여 정확히 구조화 될 수 있다. '침두구조 천막'은 주변부의 자일이 없이도 무한히 확장될 수 있다는 특징을 지니고 있으며, 이렇게 확장된 천막에서 이러한 천막구조의 합법칙성들이 명확히 드러난다. 프라이 오토는 '침두구조 천막'으로서 위 아래로 일정한 거리를 가지고 드리워져 있는 망사형 천막 구조를 개발하여 경량구조연구소 설계에 적용시켰다.

세 번째 유형은 압력을 지탱해주는 아치로 이루어진 '아치형 구조 천막(Bogenzelt)'이다. 그 형태는 천막이 아치를 넘어 드리워져 있는 형태이거나 아치를 따라 궁륭형 자일을 통해 고정되어 있는 형태이다. 특히 '아치형 구조 천막'은 1957년 독일 쾰른에서 개최된 독일정원 박람회장 입구를 장식하는 구조물로 유명해졌다. 34m에 달하는 폭을 가진 평평한 아치는 겨우

14) Otto, Frei und Rasch, Bodo: Gestalt finden : auf dem Weg zu einer Baukunst des Minimalen, p.46

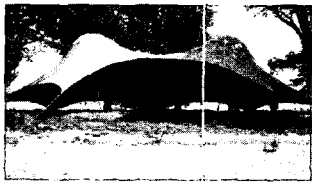
15) Ibid., p.68

17cm 직경의 강철봉으로 이루어져 있으며 지지대면에 이음새로 연결되어 있고, 유리섬유 재질의 천막은 주변부 자일들과 기둥을 통해 밖으로 드리워져 넓은 면적을 뒤덮고 있다.



<그림 11> 아치형 구조 천막, 쾰른, 1957

네 번째 유형은 하나 이상의 곱사등 형태의 고(高) 지점을 가진 '용기구조 천막(Buckelzelt)'이다. 고 지점들은 버섯모양이나 이파리 모양의 머리 부분을 가진 기둥들로 지탱되는 '용기구조 천막'은 1957년 독일 쾰른의 독일정원 박람회장에 세워진 천막 설계에 적용되었다. 이파리 모양의 나무재질 머리 부분을 가진 기둥들은 밑 부분으로부터 유압식



<그림 12> 용기구조 천막, 쾰른, 1957

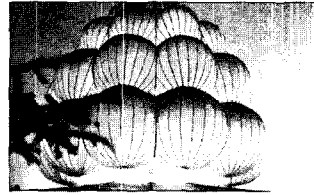
압력을 통해 지탱되면서 24 × 28m에 달하는 커다란 천막을 유지한다. 이러한 '용기구조'는 각기 다른 압력과 각도를 이용하여 부드럽게 굴곡진 형태를 만듦으로써, 천막을 인위적으로 절단하지 않고서도 원하는 형태를 구현할 수 있는 것이다.

이러한 네 가지 유형 이외에도 여러 형태의 천막구조가 존재하며 또 개발될 수 있다. 이처럼 탄력적이고 자유로운 자연적 구조가 가능할 수 있었던 것은 무엇보다 자기형성적 형태발견과정 내지는 최적의 최소면 형성과정에 대한 연구가 집중적으로 진행되었기 때문이다.

### 3.2. 수막 구조 건축

가장 단순한 형태의 수막구조는 비누막 거품이다. 비누거품들은 동일하게 굴곡진 표면들로 이루어져 있으며, 동일한 내부압력이 달성되는 순간 가장 완전한 모델을 이루게 된다. 비누 이외에도 물방울에 의해서도 유사한 구조가 만들어질 수 있다. 비누 거품막이나 수막이나 모두 분자들 사이에서 작용하는 힘들을 통해 일정한 형태가 형성되는 바, 이렇게 만들어진 형태가 갖는 특징은 표면 내부의 장력이 모든 방향으로 일정할 뿐 아니라 수직으로 작용하는 하중과 평형을 이룬다는 것이다. 결국 최적의 최소면만이 아니라 수막구조 역시 일반적인 의미의 자연영역 전체에 존재하는 가장 기본적인 구조형태들 중의 하나인 것이다.

수막구조의 건축적 변용가능성은 거의 무한할 정도로 크다. 동일한 구 형태를 계속 덧붙여 나감으로써, 혹은 압력을 달리하거나 표면막의 절단을 다양하게 변용함으로써 수많은 형태의



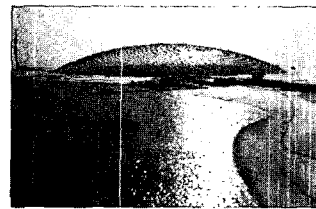
<그림 13> 뉴욕미국 박람회, 1964



<그림 14> 오사카 만국박람회, 1970

작한 구 형태를 띌 수 있었다. 프라이 오토는 이 박람회에서 최초로 수막구조 건축의 기술적이고 구조적인 다양한 가능성을 제시할 수 있었던 것이다.

1970년부터 1971년에 걸쳐 프라이 오토는 자신의 아틀리에 성원들과 켄조 단게(Kenzo Tange) 그리고 오베 아럽과 파트너



<그림 15> 남극도시, 1970 - 71

(Ove Arup and Partner)와 공동으로 획기적인 수막구조 프로젝트를 기획하였다. "남극도시"라는 이 프로젝트는 작은 도시 전체를 2km가 넘는 투명막으로 뒤덮어 추위에 관계없는 생태도시를 건축하는 것이다. 물론 이 프로젝트는 실제로 구현될 수는 없었지만, 자연적 구조 건축의 확장 가능성을 보여주는 이정표 같은 역할을 하였다.

### 3.3. 생태자연구조 건축

프라이 오토에게서 생태건축이라는 개념은 다소 다른 의미를 갖는다. 통상의 생태건축 개념이 인간에 의한 생태계 파괴에 대한 대안으로서 자연의 모습과 표면적으로 유사한 건축이나 자연을 모방하는 건축을 지향하는 것이라면, 그의 생태건축이념은 재료와 에너지 그리고 시간 등을 최소화하는 건축을 의미하였다. 재료와 에너지 그리고 시간 등의 최소화는 자연의



<그림 16> 프로젝트 슈투트가르트 21, 1997

'자기 형성과정'에서도 그대로 관찰되는 '스스로 최적화되는 과정(self-optimization process)'을 의미하는 것이다. 그에 따르면, 생태건축이라는 말이 많은 부분 오해되어왔기 때문에, 차라리 '지적인 건축(Intelligent Bauen)'<sup>16)</sup>이라고 부르는 편이 더 나을 것이



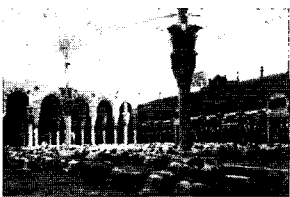
<그림 17> 슈투트가르트 지하 역사를 위한 시험모델

라고 한다. 지적인 건축이란 디자인 과정에서 생각과 계산에 더 많은 시간을 할애함으로써 재료와 에너지를 줄이는 건축을 말하는 것으로서, 생태계의 보존이나 자연친화적 구조보다는, 다시 말해 생태계 자체에 대한 연구보다는 그것을 실현시키기 위한 과학적이고 지적인 연구에 보다 더 집중하는 건축을 말하는 것이다. 그 예가 “Stuttgart 21”이라는 명칭의 프로젝트로서, 이것은 독일 슈투트가르트에 계획된 지하역사 디자인이다.

자연적이고 사회적인 환경에 부합되는 최적의 미니멀 디자인을 추구하였던 프라이 오토의 생태건축은 특히 이슬람 건축



<그림 18> 접이식 지붕 펼치기 전, 이슬람사원, 메디나



<그림 19> 접이식 지붕 펼친 후

에서 호평을 받았다. 이슬람국가들에서 가장 중요한 건축영역으로 인식되는 사원건축은 강력한 입사태양광과 통풍문제를 해결하는 것에 중점을 두어왔다. 프라이 오토 아틀리에에는 이러한 문제들을 해결하기 위해 접이식 지붕과 유동지붕을 위한 모델들을 개발하였다. 모델들을 통한 측정과정에서는 건물벽의 열흡수 및 반사 그리고 습도와 바람 등이 총괄적으로 고려되었다. 이러한 실험들을 거쳐 개발된 모델이 적용된 결과 내부 온도가 10도 이상 감소되는 효과가 얻어질 수 있었다. 이것은 자연적 구조에 최대한 부합하여 재료와 에너지 및 시간을 최소화시켜 최적의 조건을 구현하는 프라이 오토의 의미에서의 생태건축의 성과라고 할 수 있는 것이다.

### 3.4. 그물망구조 건축

프라이 오토는 자신의 아틀리에 팀과 함께 자연과 기술 영역에서 그물망구조에 관한 기초연구를 수행하면서 새로운 방법론들을 모색하였다. 그가 개발해낸 그물망 구조는 지상에서건 공중에서건 건립될 수 있는 구조로서 건축용 보조틀 없이도 용이하게 건축된다는 이점만이 아니라, 일정한 간격의 그물망을 기계적으로 미리 생산하여 현장에서 조립되기 때문에 조립과 운송의 편리함이라는 이점 역시 가지고 있다.

1965년 캐나다 몬트리올에서 개최된 박람회의 독일관 건축



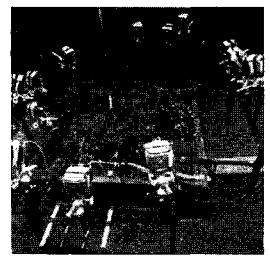
<그림 20> 몬트리올 엑스포 독일관, 1967

공모전에서 프라이 오토는 페터 슈트로마이어(Peter Stromeyer)와 함께 그물망 구조건축으로 1등을 차지하여 그물망 건축을 세계에 알리게 되었다. 계획부터 완성에 이르기까지 단지 13개월의 기간이 소요될 수 있었던 것은 간단한 그물망 생산과 용이한 조립과정 그리고 무엇보다 안정적인 형태의 자연적 구조를 위한 과학적인 연구가 뒷받침되었기 때문이다. 그물망은 12mm 두께의 철사줄을 50cm 간격으로 엮어 만들어졌으며, 전체 그물망구조는 8개의 고 지점들과 3개의 저 지점들로 이루어졌고, 14m와 35m 사이에는 기둥들이 받쳐져 있었다. 8천 평방미터에 달하는 전체 면적을 뒤덮는 천막은 PVC 처리된 폴리에스테르 재질로 이루어졌고 그물망과 50cm 간격을 두고 그물망 밑에 평평하게 펼쳐졌다.

특히 이 프로젝트에서 프라이 오토는 자신의 기본적인 건축이념, 즉 최소한의 재료를 사용하여 최적의 건축을 설계하고자 하는 그의 고유한 미니멀리즘에 충실히 부합하여 몇 가지 획기적인 고안을 하였다. 그 중에 하나가 자일들의 결합과 방향전환을 가능케 해주는 연결 장치로서, 이를 통해 다양한 각도로 자일들을 엮기 설기 엮는 것이 가능해짐으로써, 모서리나 귀퉁이 부분과 같이 작업이 용이하지 않은 부분들에서도 용이하게 작업이 이루어질 수 있었던 것이다. 뿐만 아니라 이 시스템은 비용절감과 산재예방 그리고 자일과 연결부위의 재활용과 같은 이점 역시 지니고 있기 때문에 커다란 구조물 건축에서 계속해서 적용될 수 있었다.



<그림 21> 뮌헨 올림픽 스타디움, 1968

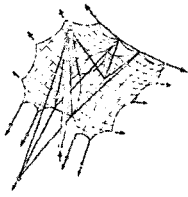


<그림 22> 뮌헨 올림픽 스타디움 모델측정 실험

1968년 프라이 오토는 포스트 모던 건축가로 알려진 귄터 베니쉬(Günter Behnisch)의 독일 뮌헨 올림픽 스타디움 공모전 작품을 위한 지붕덮개구조를 디자인해달라는 위탁을 받았다. 베니쉬의 공모전 작품의 기본 컨셉은 프라이 오토의 몬트리올 독일관의 그물망구조를 원형으로 삼았기 때문에 프라이 오토의 참여는 필수적이었다. 프라이 오토는 수많은 모델들을 개발하고 실험한 끝에 ‘망사모델’에 근거한 최종모델을 완성하였다. 그는 자신의 연구소에서 그물망과 지지대 그리고 다양한 장력들에 대한 수학적 정교한 계산과 포토그래메트릭 기술 및 3차원 영상측정에 의거하여 1:125 비율의 측정모델을 만

16) Otto, Frei, Intelligent Bauen - Aspekte einer anderen Baukultur, in: IL(Institut für leichte Flächentragwerke an der Universität Stuttgart) 41, Karl Krämer Verlag, Stuttgart 1995





<그림 23> 측정모델에 따른 스케치

올림픽 스타디온의 지붕덮개구조 디자인은 자연적 구조의 건축이 특정한 건축이념이나 사조를 떠나 보다 근본적으로 자연과 테크닉을 하나로 아우르는 건축의 지향점을 지시해준다는 사실을 드러내주었던 것이다.

들었다. 특히 모델의 구성과정에서는 표면장력, 기둥들의 지지력, 이로부터 생겨나는 형태변화와 하중도, 그리고 눈이나 비와 같은 외부 하중이 가해질 때 있을 수 있는 추가적인 하중 등이 중점적으로 고려되었다. 결국 프라이 오토의 뮌헨

이러한 경량건축의 기본 원리는 자연의 '자기 형성과정'에 유비적인 구조화 과정들을 과학적인 실험들과 성찰들에 근거하여 유형화 시켜 이로부터 '최소의 재료, 에너지, 시간을 들여 최적의 구조를 찾아내는 것'에 목적을 두고 있음으로써, 자연에 대한 자의적이고 인위적 규정을 기초로 하여 친환경적이고 자연 친화적인 건축을 이룩하고자 하는 기존의 모호한 생태건축 개념에 일정한 좌표와 이론적 기반을 제공해 주는 것이다. 그는 다른 건축가들처럼 자기 고유의 혹은 시대적 흐름에 부합되는 건축양식을 발전시킨 것이 아니라, 어떠한 형태의 구조든 그러한 구조 자체를 살아 숨 쉬게 만드는 기본 조건들을 창출하였던 것이다. 결국 그의 건축적 형태에 대한 추구는 보편적인 의미의 자연적 형태의 추구에 다름 아닌 것이다.

#### 4. 결론

건축사가인 지그프리트 기디온(Sigfried Giedion)은 건축의 세 가지 공간이해를 역사적으로 도식화한 바 있다<sup>17)</sup>. 그러나 근대라는 훨씬 더 짧은 기간에도 유사한 형태의 단계가 존재함을 알 수 있다. 근대에 이루어진 세 단계의 공간이해는 특히 생명체의 형태와 구조에 관한 논의들에서 명확히 드러난다. 첫 번째 단계에서는 유기체의 형태에 대한 관심과 더불어 형태학(Morphology)이 생겨났으며 식물과 동물에 대한 체계적인 이해가 이루어졌다. 두 번째 단계에서는 생명체 내부의 구조에 대한 관심이 분자영역에까지 이르게 됨으로써 분자생물학적인 생명체 이해가 이루어졌다. 이같은 생명체에 대한 이해의 발전 과정에도 불구하고 생물학자들에 의해 도외시되었던 것은 생명체의 형태학에 대한 파악이 내부와 외부의 결합 및 생명체 자체에 대한 역동적인 관찰을 필요로 한다는 사실이다. 기디온이 말하고자 한 세 번째 단계의 공간이해와 관련되듯이, 현대에 요구되는 공간이해는 바로 자연에 대한 이 같은 역동적인 이해 및 관찰방식을 요구하는 것이다.

자연과 기술 영역에서 발견되는 자기형성과정과 긴밀하게 결부된 프라이 오토의 경량건축 내지는 적응력있는 건축의 기저에는 바로 이 같은 관찰방식이 놓여 있으며, 이에 대해 프라이 오토는 다음과 같이 함축적으로 주장하고 있다: "살아있는 자연과 이러한 자연의 종류들 및 개체들이 전체 자연과 더불어 자신들의 소 생활권들 및 생태체계들과 이루는 전체 맥락 속에서 생겨나도록 해주었던 체계적인 과정들에 대한 이해를 통해서 비로소 보다 더 실제적인 자연이해가 마련될 수 있는 것이다"<sup>18)</sup>. 이러한 관찰방식에 기초한 경량건축의 원리는 그의 기술적이고 예술적인 창작을 규정하는 기본 태도인 것이다. 결국

#### 참고문헌

1. Frei Otto. Das Gesamtwerk. Leicht bauen - natürlich gestalten, (Hg.) Winfried Nerdinger, Birkhäuser, München 2005.
2. Frei Otto, Auffassungsfähig Bauen, in: IL(Institut für leichte Flächentragwerke an der Universität Stuttgart) 14, Karl Krämer Verlag, Stuttgart 1974.
3. Frei Otto, Kräfte, die Objekte bilden, in: IL(Institut für leichte Flächentragwerke an der Universität Stuttgart) 23, Karl Krämer Verlag, Stuttgart 1992.
4. Frei Otto, Belastung, in: IL(Institut für leichte Flächentragwerke an der Universität Stuttgart) 24, Karl Krämer Verlag, Stuttgart 1998.
5. Frei Otto, Vorwort, in: IL(Institut für leichte Flächentragwerke an der Universität Stuttgart) 21, Karl Krämer Verlag, Stuttgart 1979.
6. Frei Otto, Intelligent Bauen - Aspekte einer anderen Baukultur, in: IL(Institut für leichte Flächentragwerke an der Universität Stuttgart) 41, Karl Krämer Verlag, Stuttgart 1995.
7. Frei Otto und Bodo Rasch: Gestalt finden : auf dem Weg zu einer Baukunst des Minimalen, Ed. Menges, Stuttgart 1995.
8. Frei Otto, Zum Vorbild Natur In: Morphologie/Neobiologie, form+zweck 17, Berlin, 2000.
9. Sigfried Giedion, Architektur und das Phänomen des Wandels, Tübingen 1982.

<접수 : 2006. 10. 31>

17)Giedion, Sigfried, Architektur und das Phänomen des Wandels, Tübingen 1982. 참조

18)Otto, Frei, Zum Vorbild Natur, In: Morphologie/Neobiologie, form+zweck 17, 32 Jahrgang, Berlin 2000, p.26