

폴딩을 이용한 구조와 형태

Structure and Form Derived from Folding; from Pleated Shape to Deployable Structure

박 선 우*
Park, Sun-Woo

최 선 영**
Choi, Sun-Young

최 취 경***
Choi, Chui-Kyung

요 약

폴딩은 면에 기하학적 형태를 부여하는 동시에 역학적 효율을 증대시킬 수 있다. 본 연구의 목적은 건축의 조형성에 영향을 미칠 수 있는 폴딩을 구조와 형태의 매개로서 탐구하고, 그 역할과 가능성을 고찰하는 것이다. 따라서 먼저 폴딩의 특성과 패턴형성의 요소 및 이를 이용한 공간의 구성양식을 살펴본다. 또한 절판구조와 막구조에서 보이는 폴딩의 변형과 응용 방법을 파악함으로써 조형요소로서 역할과 가능성을 확인하고, 전개성을 응용한 형태로서 전개구조의 가능성을 확인한다.

Abstract

The purpose of this study is to explore folding as a tool diversifying structures and shapes or forms, and to consider the role and possibilities as structural design sources. First, the morphological characteristics and the elements for transforming pattern of folding are investigated and the way of forming space is also shown. Secondly, the application methods and systems of folding are described.

키워드 : 폴딩, 플리트, 패턴면

Keywords : Folding, Pleat, Pattern Plane

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

폴딩은 기하학으로부터 유래한 것으로 알려져 있는데, 이것에 의해 만들어지는 규칙적인 패턴의 조형미는 이미 여러 분야에서 널리 사용되고 있다. 주변에서 흔히 볼 수 있는 조명 갯이나 스커트 등과 같은 소품으로부터 건축물-강성구조뿐 아니라 인장구조까지-에 이르기까지 폭넓은 사례에서 응용되고 있는 것을 볼 수 있다.

평평한 면에 폴딩을 적용하면 다양한 패턴을 생성할 수 있을뿐 아니라 역학적 효율성 역시 높아진

다. 이렇게 형태의 변화를 피하는 것이 동시에 역학적 특성을 변화시킬 수 있다는 사실로 인해 폴딩은 건축형태에서 조형성을 확보하기 위한 수단으로 이용될 수 있다.

예를 들어, 공간을 구성하기 위한 구조형식으로서 폴딩을 이용한 절판구조에서는 보다 얇은 면, 막구조에서는 보다 낮은 입면 형상이 가능하다. 그러나 대상의 규모나 재료가 같아도 폴딩 패턴이 만드는 형태에 의해 성능이 변화하는 특성을 보이므로, 건축물의 특성에 따라 계획단계에서 패턴의 조형요소를 인지할 필요가 있다.

이에 따라 본 연구에서는 폴딩의 기본적인 특성과 패턴의 조형요소 및 공간을 구성하는 양식을 살펴보고, 절판과 막구조에서 폴딩 패턴의 조형효과를 확인한다. 또한 폴딩의 변형과 전개성의 응용을 통해 활용 가능성을 파악하고자 한다.

* 정희원, 한국예술종합학교 건축과 교수

E-mail : psw@knu.ac.kr

** 정희원, IESD 책임연구원

E-mail : suny_choi@hotmail.com

*** 정희원, 경원대학교 건축공학과 교수

E-mail : abc@kwc.ac.kr

1.2 연구방법 및 범위

실제로 폴딩에 의한 만들 수 있는 패턴은 무수히 많기 때문에, 본 연구에서는 고찰 범위를 평면의 플리트(pleat)가 규칙성을 보이도록 폴딩하는 방식으로 제한한다.

폴딩 패턴의 조형요소를 고찰하기 위해서 먼저 폴딩의 기본원리와 특성을 개념적 수준에서 다루고, 이들 요소로 형성 가능한 공간형태를 살펴본다. 기존에 알려진 사항은 각종 문헌자료로부터 확인하여 재구성한다.

또한 폴딩을 이용한 구조형식인 절판과 막구조에서 조형변화를 피할 수 있는 방안을 파악하기 위해서는 건축 사례조사와 모델링 작업을 병행한다. 끝으로 전개구조에 사용되는 폴딩의 확인을 통해 응용과 활용 가능성을 탐구한다.

게재된 사진들 중 일부는 참고문헌에서 인용하였다.

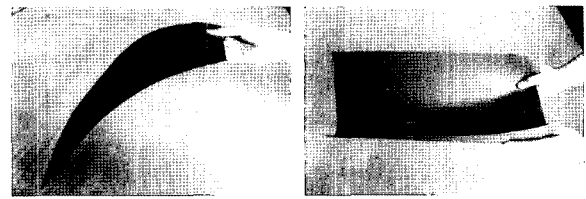
2. 폴딩의 특성 및 조형성

2.1 폴딩의 개념 및 특성

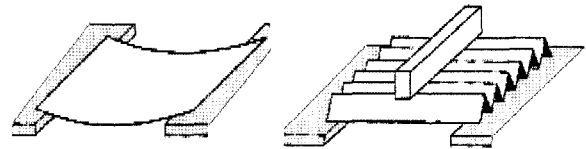
폴딩의 개념은 기본적으로 얇은 평판을 구부리거나 접어서 기하학적 패턴을 만드는 것이지만, 이것은 간단한 조작으로 면형태를 변화시키는 것만 아니라 상당한 역학적 효율성을 수반한다.

<그림 1(a)>에 보이는 얇은 종이면의 강성과 강도는 자체의 무게를 전달하기에 불충분하지만, 이것을 구부린 단순한 형태만으로 자체 무게의 몇 배를 지지할 수 있다. 또한 <그림 1(b)>와 같이 일종의 규칙적인 플리트가 형성된 형태는 지점 사이에서 가해지는 하중에 저항할 수 있다.

이런 특성은 사실 폴딩에 의해 만들어지는 반복적인 기하학적 패턴의 형상으로부터 기인한다. 폴딩에 의한 패턴의 단위면은 경사지게 되고, 이것의 조합은 3차원 공간을 구성한다. 평평한 얇은 면구조의 능력은 제한적이지만, 폴딩된 형태는 단면 2차모멘트의 증가와 함께 강성을 크게 개선시키며 구조적 거동에 영향을 미친다¹⁾. 이것은 곡선형 판의 경



(a) 역학적, 성능의 변화



(b) 형태와 역학적 거동

<그림 1> 폴딩의 개념

우도 마찬가지이다.

따라서 구조물의 규모나 재료가 같아도 폴딩에 의한 패턴에 따라 그 성능이 변화하게 되므로, 건축의 경우에는 적절한 형상과 패턴의 선택에 의해 공간구성과 구조성능의 효율증대를 도모할 수 있다.

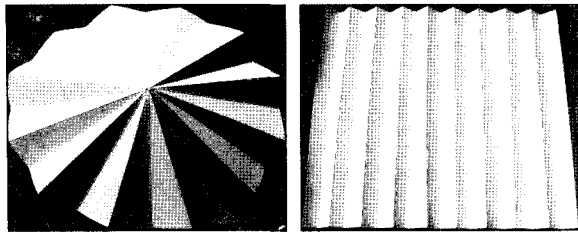
2.2 폴딩 패턴의 조형(造形)

폴딩된 형태의 대부분은 종이접기 혹은 오리가미(origami)라 불리는 간단한 작업을 통해 확인할 수 있고, 표현할 수 있는 기하학적 패턴들은 놀라울 정도로 다양하다. 그러나 건축에서는 몇 가지 규칙적인 패턴이 주로 이용되고, 폴딩에 의한 패턴형태는 크게 면의 플리트 형성방법, 패턴 단위면의 형태, 그리고 패턴 입면형태의 조합에 따라 변화한다.

우선 면의 플리트를 형성하는 방법으로는 잘 알려져 있는 다면체의 전개를 이용하는 것과 대상면을 일정한 패턴으로 분할하여 접거나 구부리는 두 가지가 있다. 두 번째 방법은 다시 폴딩의 방향성에 따라 <그림 2>에 보이는 것처럼 방사형과 병렬형으로 구분할 수 있다.

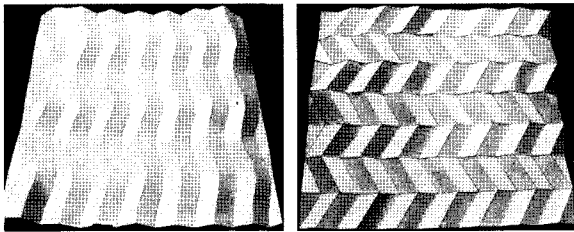
다면체 전개에 의한 패턴의 단위면은 이용한 다면체의 면형태(도형)가 되고, 패턴 폴딩에 의한 형태는 기하학적 관점에서 다시 직선형과 곡선형으로 구분한다<그림 3>. 곡선형의 단위면 형태는 규정하기 어려운 만큼 거의 제한이 없고, 직선형에서는 주로 사다리꼴, 마름모, 삼각형 및 사각형 등이 사용된다. 삼각형 단위면의 거울 이미지를 연결하면 바

1) W. Schueller, Horizontal-Span Building Structures, John Wiley & Sons Inc., New York, 1983, pp.367



(a) 방사형 (b) 병렬형

<그림 2> 폴딩의 방향성



(a) 곡선형 (b) 직선형

<그림 3> 패턴의 단위면

로 마름모 형태가 되고, 이것은 사다리꼴과 일부 특성을 공유한다.

그리고 플리트와 단위면이 형성하는 폴딩의 주기(cycle)에 따른 가장자리 형태, 즉 폴딩-업과 폴딩-다운에 의해 완성되는 일종의 입면형태 역시 패턴의 조형요소이다. 이것은 톱니형, 산형, 문형 등의 변형과 조합이 가능하다.

패턴의 입면형태는 골(valley)과 마루(ridge)가 이루는 사이각을 달리하여 다양하게 조절할 수 있는데, 이때 입면형의 깊이는 건축형태에서 휨강성의 조절을 위해 변화되는 양상을 보이기도 한다.

위와 같이 폴딩에 의한 패턴의 조형에 영향을 미치는 요소들은 <표 1>에 나타낸 바와 같다. 폴딩에 의한 조형성은 위의 패턴 구성을 응용하거나 조합

<표 1> 폴딩 패턴의 조형요소

플리트		패턴면 형태	입면형태
다면체 전개		도형	Various
패턴 폴딩	방사형 병렬형	곡선형	톱니형 산형 문형 조합형
		
		직선형	
		사다리꼴 마름모 삼각형 사각형	

하여 증대시킬 수 있을 뿐 아니라, 패턴면 자체를 면재가 아닌 선재 네트워크로 구성하는 것, 또는 폴딩에 의해 만든 패턴을 펼치고 접는 것(전개구조) 등을 포함하여 다양한 가능성을 시사한다.

2.3 공간구성

기하학적 패턴으로 조형미를 얻을 수 있는 동시에 역학적 효율성 증대를 기대할 수 있는 폴딩의 특성을 이용하면 일정한 형태를 가진 3차원의 공간을 구성할 수 있다. 폴딩은 공간의 일부 또는 전체 형상에 적용될 수 있는데, <그림 4>는 폴딩의 적용에 의한 공간구성의 범위 및 형태구성의 유형을 보여주는 것이다.

폴딩에 의해 형성된 공간은 사용된 패턴뿐 아니라 이를 적용한 구조형식에 따라 거동이 크게 다르다. 이것은 건축의 절판 프레임과 배럴볼트를 비교해보면 명백해진다. 또한 지지부 폴딩 패턴 배열의 연속성은 힌지가 형성되는 곳과 구조적 작용이 선형인지 면작용인지 여부를 결정한다.

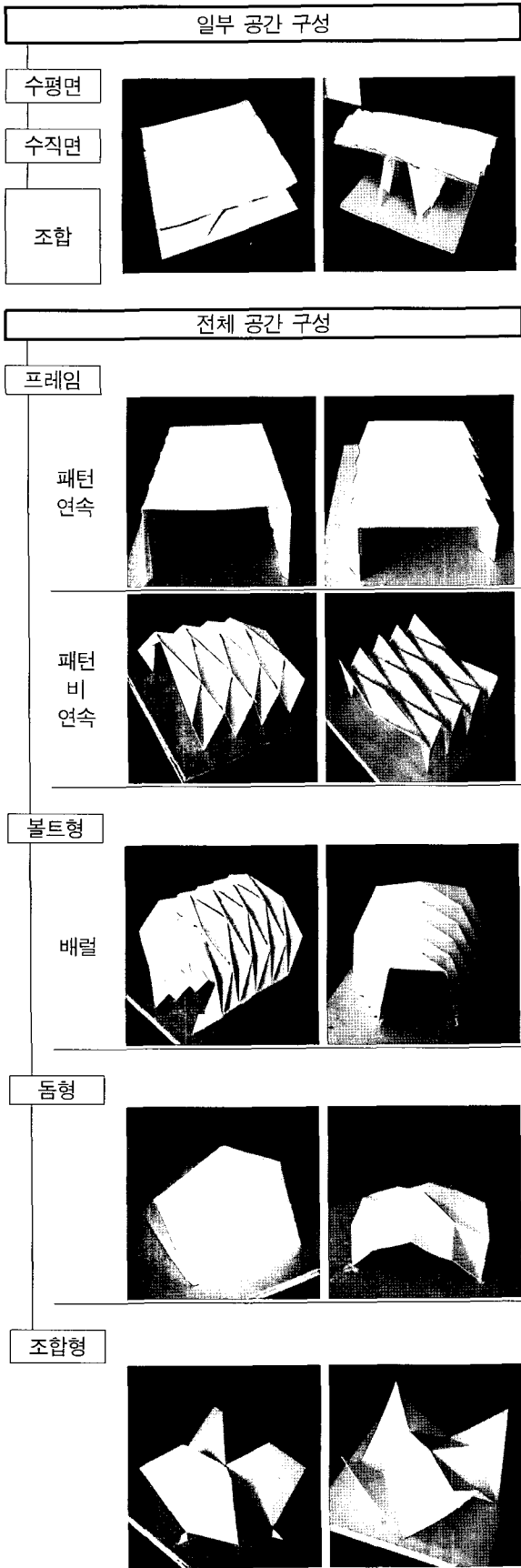
3. 폴딩을 이용한 구조와 형태

절판구조의 보나 슬래브 혹은 전체 외피에서 드러나는 폴딩 형상들과 막구조에서 폴딩으로 주름진 패턴이 보이는 조형미는 다양한 폴딩 패턴의 활용과 응용 가능성을 보여준다.

3.1 절판구조와 응용

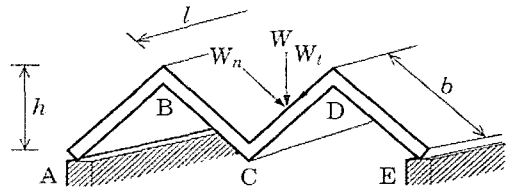
절판구조는 폴딩의 개념과 특성을 건축에 실현한 대표적인 구조형식이다. 이것은 일반적으로 구조요소(부재) 중에서 슬래브와 벽체의 형상 및 역학적 성질을 아울러 가지는데, 기본 개념은 <그림 5>에 보이는 것과 같다.

절판구조에 가해진 연직하중은 면외(W_n) 및 면내 하중(W_i)으로서 작용한다. 면외하중은 변형과 휨모멘트를 유발하지만, 이것들은 폴딩되지 않은 평판에 비해 매우 작다. 또한 패턴면의 폭(b)이 짧을수록 그 값은 더욱 작아지며, 마루와 골의 고저차(입면 깊이, h)가 클수록 휨과 변형에 대한 저항성은 증대

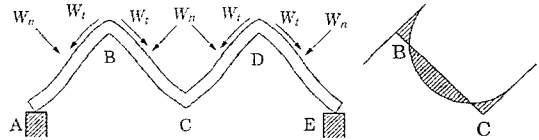


〈그림 4〉 폴딩을 이용한 공간구성 예

한다. 면의 구배에 평행으로 작용하는 면내하중은 아치의 추력과 비슷한 작용을 하므로, 횡방향 변위와 지점의 이동에 대한 조처를 필요로 한다.



(a) 절판의 형태와 하중분포



(b) 절판의 변형

(c) 모멘트

〈그림 5〉 절판구조의 거동²⁾

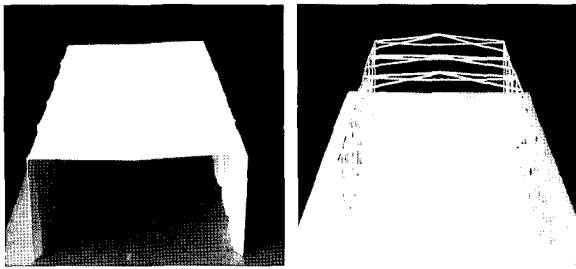
절판구조는 폴딩의 특성을 이용하여 언급한 원리로 힘을 전달하고, 절판 면에 휨모멘트가 발생하지만 주요한 응력은 주로 면내력이 된다. 이로 인해 보다 얇은 두께로 큰 스패를 구성할 수 있으므로 지주를 두지 않는 대형공간의 건축형태를 구성하는 방식으로서 이점이 있다.

재료의 측면에서는 거푸집을 이용한 조형의 용이함 등으로 주로 철근콘크리트(이하 RC)가 이용되지만 강재, 혹은 강재와 RC를 혼용하여 절판면을 구성하는 것은 보다 흥미로운 조형효과를 보여줄 수 있을 것이다. 이것은 플리트 부분과 패턴면에 강성 선재를 이용하는 것이다.

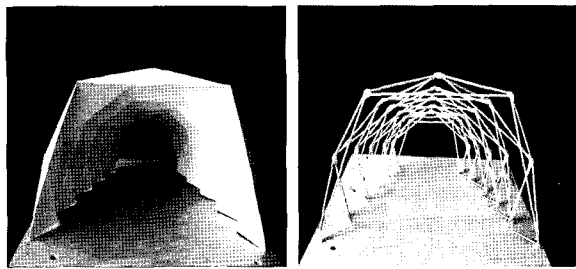
즉, <그림 4>에 보이는 폴딩을 이용하여 공간의 형태를 구성하도록 제작한 면재 모델들은 플리트와 패턴면 부분의 구조재 변경을 통해 다시 선재 모델로 전환될 수 있다. <그림 6>은 이런 모델링 작업을 통해 일부 가능성을 확인한 것이다.

이런 방식으로 절판구조에서 폴딩의 특성을 충분히 살리고, 절판면 조성방법의 변경을 통해 독특한

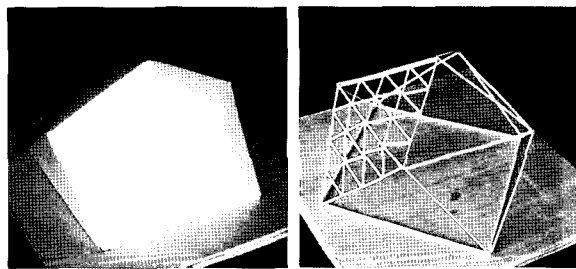
2) 皆川洋一, “建築空間構造”, ホーム社出版局, Tokyo, 2002, pp.51



(a)



(b)

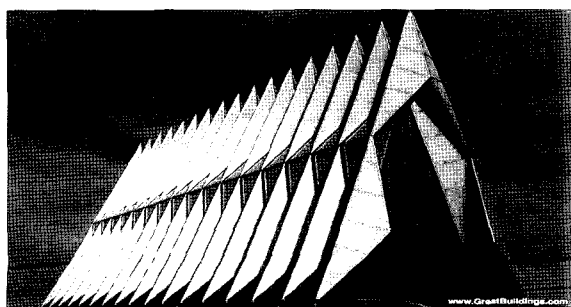


(c)

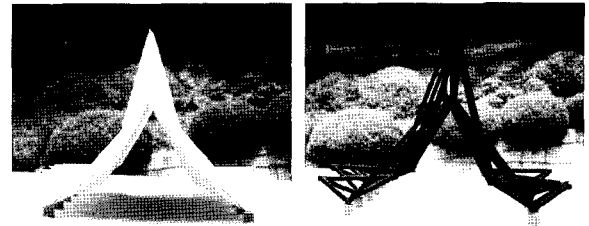
〈그림 6〉 절판의 조형변화

시각적 효과를 드러낸 대표적인 예로는 <그림 7>의 미국 공군사관학교 예배당(1961년)을 들 수 있다.

이 건축물은 절판면에 상당하는 부분을 철판트러스를 이용해 4면체를 만들고, 이것을 조립해서 45m 높이의 절판구조를 실현하고 있다. 절판면은 금속시트 마감이 되어 RC에 의한 절판구조와는 다른 날렵하고 질서있는 조형미를 자아내고 있다. <그림 8>은 이런 과정을 모델로 형상화 한 것이다.



〈그림 7〉 미국 공군사관학교 예배당³⁾



〈그림 8〉 면재와 선재에 의한 절판 구성

3.2 막구조와 응용

폴딩된 막구조는 절판구조의 연장선이라 할 수 있다. 막구조에서 폴딩을 이용하여 얻을 수 있는 조형효과 중 하나는 현수막이 매달리는 고점(high point)을 고선(high line)으로 대체할 수 있다는 것인데, 이것으로 낮은 입면(라이즈)의 형상을 얻을 수 있다<그림 9>. 즉, 폴딩이 만드는 패턴면 자체가 평평한 면을 제공하므로 패널이나 그와 유사한 형태로의 응용이 가능하다.

막구조에서 폴딩의 또 다른 장점은 이런 고선의 패턴을 유지하기 위해서 일정한 간격으로 플리트에 사용되는 케이블이나 강성 지지체가 막의 형태유지 외에도 이것을 안정화시키는 역할을 수행할 수 있다는 점이다.

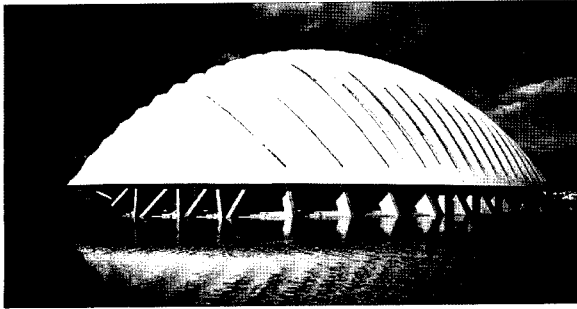
그러나 케이블이 추가되고 때로는 스트럿이 필요하기 때문에, 이와 관련된 재료와 디테일 비용이 추가될 수 있다. 또한 미학적인 측면에서는 막의 고저점 지지에 의한 안티클래스틱 곡률의 외부 형상이 불가능하기 때문에 밋밋한 입면에 대한 지적이 있을 수 있다.

한편, 절판구조와 달리 막구조에서는 폴딩 패턴의 플리트를 보다 부드럽게 보이도록 하여 조형변화를 꾀할 수 있다. 이 방법으로는 패턴면의 높이를 낮추는 것이 우선 고려될 수 있고, 다른 방법은 케이블(혹은 강성 지지체) 주위의 유효 반경을 키우는 것이다.

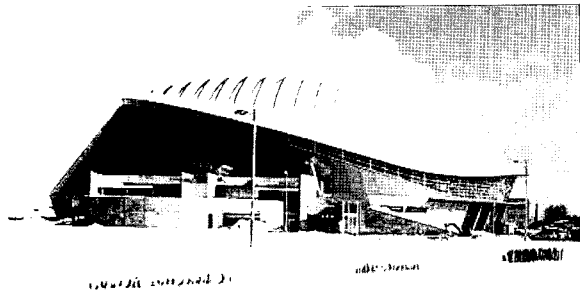
그러나 플리트를 유지하는 케이블의 수를 조절하는 것 또한 폴딩 패턴을 보다 부드럽게 보이도록 하면서 막 면의 곡률 분배를 돕는다. <그림 10 (b)>와

3) Skidmore, Owings & Merrill LLP (SOM) 설계, 사진 <http://www.greatbuildings.com>

4) 사진 <http://www.pleatedstructures.com>



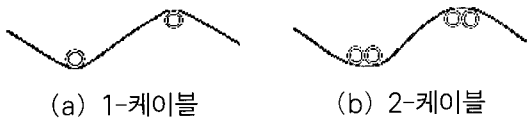
(a) 오다테 쥬카이 돔



(b) 삿포로 커뮤니티 돔

<그림 9> 폴딩에 의한 막구조의 고선4)

같이 직접 접한 2개 이상의 케이블들은 패턴 면의 깊이를 낮추어 보다 평평한 입면을 가능하게 하고 부드러운 곡률을 만든다.



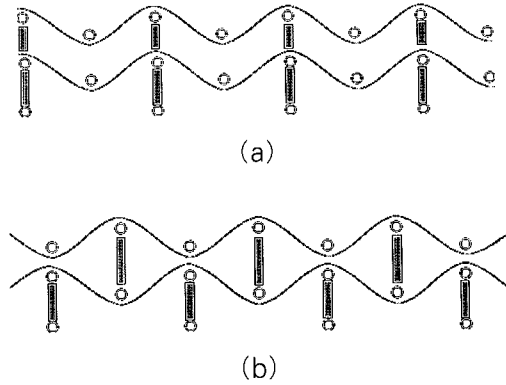
(a) 1-케이블

(b) 2-케이블

<그림 10> 케이블 수와 플리트의 곡률 변화

플리트에 변화를 주는 또 다른 선택은 복층 (multi-layer)으로 폴딩 패턴을 배열하는 것이다. 이를 위해서는 케이블을 지지하는 규칙적인 스트럿이 사용되고, <그림 11>과 같이 크게 두 가지 방식이 이용될 수 있다.

<그림 11(a)>의 복층 배열 방식은 막재 사이에 일정한 두께의 층을 만들지만 상부 스트럿은 하부 케이블과 스트럿을 아래로 누르게 되고, 이 상태를 유지하기 위해서는 상당한 균형력이 필요하다. <그림 11(b)> 방식은 안정화 면에서 보다 유리하고, 리듬감 있는 입면 형태가 가능하다.



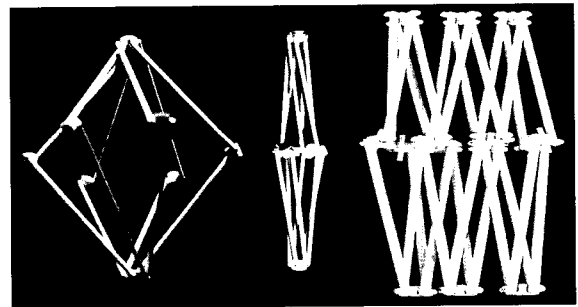
(a)

(b)

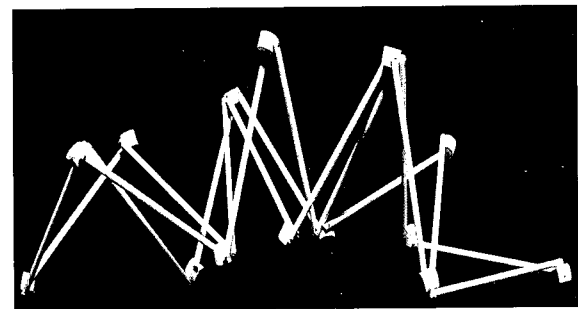
<그림 11> 폴딩 패턴의 복층 배열

4. 폴딩 패턴의 응용; 전개구조

전개구조는 구조물의 부피를 줄일 수 있는 장점으로 인해, 변화하는 건축공간의 구성은 물론, 개방적이고 창의적이며 경제적인 공간 구성에 적합한 구조 형식의 한 유형이 될 수 있다. 종이접기를 통해 확인해보면 폴딩 형태는 패턴 전개에 의해 그 자체가 이런 전개구조의 가능성을 시사한다.



(a)



(b)

<그림 12> 폴딩을 이용한 선재 전개구조5)

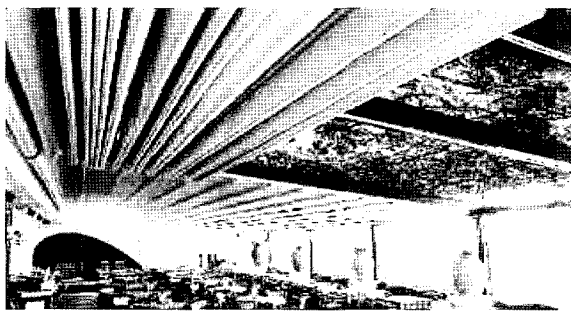
5) A. Tzonis, "Santiago Calatrava's Creative Process Part I : Fundamentals", Birkhäuser, Switzerland, 2001, pp.168-175

폴딩을 전개구조의 구성에 응용하는 방법의 한 가지는 우선 <그림 6>의 선재 모델과 같이 패턴면과 플리트를 강성 선재로 변경하고 접합부를 변환하는 것이다. 다른 한 가지는 막이 패턴을 유지하면서 접히거나 퍼질 수 있도록 지지체(혹은 케이블 트롤리)를 구성하는 것이다.

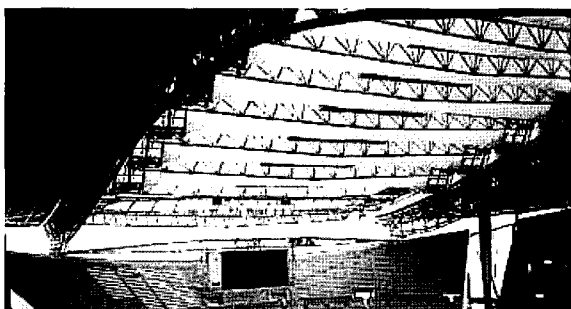
첫 번째의 경우는 선재가 마찰이 없이 분절되도록 연결하고, 그 접합부는 시저(scissor)접합한다<그림 12>. 실제 전개구조에서는 접힌 상태에서 최종 형태로 전개되었을 때 안정될 수 있는 방안에 대한 고려가 필요하지만, 여기서는 폴딩 패턴의 전개에 주목하고 있으므로 이와 관련된 사항은 다른 범주의 연구가 될 것이다.

막의 폴딩을 이용한 전개구조는 개폐식 시스템의 일부로서 적극적으로 이용되고 있는데, 그 이유 중 한 가지는 막의 유연한 변형(혹은 변경) 가능성 때문이다. 이로 인해 막의 폴딩 전개는 작은 건축물 지붕으로부터 대형 스타디움까지 다양한 규모의 구조물에 적용될 수 있다<그림 13>.

폴딩을 이용한 막의 전개에서는 막면의 플리트 형태와 깊이 등이 구조물의 전체 형상에 영향을 미



(a) 테라스 지붕



(a) 토요타 아레나

<그림 13> 폴딩을 이용한 막의 전개

치는 기하학적 요소가 된다. 또한 실제로 적용하기 위해서는 전개시 막재가 매끄럽고 합리적으로 폴딩 되도록 전개방식이 결정되어야 한다.

이런 전개방식은 막재를 지지하는 구조의 이동 여부, 막재의 이동방식에 따라 크게 세 가지 유형으로 분류된다. 케이블을 따라 부채와 같이 접을 수 있는 형태, 지지구조가 이동하는 슬라이딩 패널 형태, 지지구조의 펼침과 감김을 이용하는 방식이 그것이다.

5. 결 론

폴딩은 면의 역학적 효율성을 높일 수 있고, 폴딩과 더불어 생성된 다양한 형태의 패턴은 건축의 조형변화를 추구하는 수단으로 이용될 수 있다. 본 연구에서는 다음과 같은 결과들을 확인할 수 있었다.

- 1) 폴딩 패턴의 조형요소는 플리트, 패턴면 형태, 그리고 입면형태로 구분되고, 이것은 플리트 형성방식에 따라 다양한 변화와 조합이 이루어진다.
- 2) 폴딩에 의해 구성되는 공간의 형태는 패턴과 구조형식에 따라 변화한다.
- 3) 폴딩을 이용한 절판구조는 보다 얇은 면을 얻기 위해 패턴의 변화를 수용할 수 있고, 패턴면의 구성은 구조재에 따라 변화한다.
- 4) 폴딩을 이용한 막구조에서는 보다 낮은 입면형상을 얻을 수 있어서, 전체 형상의 조형요소로 기능한다.
- 5) 폴딩의 변형과 전개성은 선재와 막재의 전개구조로 응용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. F. Otto, "Tensile Structure", MIT press, 1973
2. W. Schueller, "Horizontal-Span Building

- Structures”, John Wiley & Sons Inc., New York, 1983
3. A. J. Macdonald, “Structure & Architecture”, Butterworth Architecture, 1994
4. H. Engel, “Structure Systems”, Gerd Hatje Publisher, 1997
5. F. Moore, “Understanding Structures ”McGraw-Hill Science, 1998
6. W. Zalewski & E. Allen, “Shaping Structures”, John Wiley & Sons Inc., New York, 1998
7. K. Ishii, “Structural Design of Retractable Roof Structures”, WIT Press, Southampton, Boston, 2000
8. A. Tzonis, “Santiago Calatrava’s creative process part I : fundamentals”, Birkhäuser, Switzerland, 2001
9. 皆川洋一, “建築空間構造”, ホーム社出版局, Tokyo, 2002
10. D. L. Schodeck, “Structures”, 5th Ed. Prentice Hall, New Jersey, 2004