전개구조시스템의 안정화 방법에 관한 연구

A Study on Stabilizing Method of Deployable Systems

김 승 덕*

Kim, Seung-Deog

박 선 경**

Park, Sun-Kyeong

Abstract

Deployable structure is a system on which the study is being actively performed in various fields including architecture field. However, There is little study which can enhance the practicality since the interpretation condition is difficult as the unstable structure in the architecture field. In this study, the Scissors system has been focused on among the Deployable structure. The structure was developed using the Scissors system and the Mock-up test was performed. Through this, the unfolding method was proposed and the practicability was surveyed through the specific design of the Test model. Also, the structure stability was reviewed through structure analysis of Mock-up test model. and stabilizing method was proposed.

Keywords : Deployable System, Meridian Grid, Mock-up test, Stabilizing

1. 서론

전개형 구조물(Deployable Structures)은 설치, 이동 및 보관이 용이하고, 재활용과 재사용이 가능하며, 다양한 상황에 대해 대처할 수 있는 유연성을 가졌고, 건축분야 외에도 다방면으로 활발하게 연구되고 있는 시스템이다.

〈Fig. 1〉 Scissor-like element

1961년 스페인 건축가 Perez Pinero^[1]는 <Fig. 1>에서와 같은 팬토그래프(Pantograph)의 원리를 사

용하여, 처음으로 전개형 구조물을 소개하였다. 그 후 1976년 Theodore Zeigler^[2]는 Pinero의 구조물의 취약점을 보완하여 디자인한 모델로 특허를 받았다. 그러한 여러 연구 결과들 중에서 가장 주목할 만한 것이 바로 스페인 세빌의 건축학 교수인 Felix Escrig^[3]의 연구였다. Escrig는 기본적인 이론으로 <Fig. 1>의 팬토그래프(Pantograph)를 다시 거론하였다. Escrig는 처음으로 전개가능 구조의 해석을 다루었고, 구조물이 접히고 퍼지기 위한 조건을 제시하였으며, 구면 그리드 분할 방법을 연구하였다.

그러나 건축분야에서는 불안정구조물로서 해석조건이 어려우므로 실용성을 높일 수 있는 연구들이 아직 미비한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 전개형 구조시스템을 이용하여 불안정구조물인 전개구조물의 해석조건을 가정하여 실용 가능성을 알아보고자 한다.

전개구조시스템은 전개형상에 따라 가위형 구조, 접이형 구조, 공기압형 구조, 텐세그리티형 구조, 개폐형 구조로 나눌 수 있다. 그 중 가위형 구조시스템은 전개방식이 단순하고 활용도가 매우 높은 방식이

* 정회원, 세명대학교 건축공학과 정교수, 공학박사
Architectural Engineering, Semyung University

** 교신저자, 세명대학교 대학원 건설공학과 석사과정
Architectural Engineering, Semyung University
Tel: 043-649-7082 Fax: 043-649-7082
E-mail : Sunkyeong@naver.com

다. 따라서 가위형 구조시스템을 이용하여 전개형 구조물을 개발하고, Mock-up test를 통하여 전개가능 여부를 검토한다. 그리고 전개구조물의 해석조건을 가정하여 Mock-up test model의 구조해석을 통해 안정화 방법을 제시하고자 한다.

2. 전개구조물 개발

Meridian grid는 대칭이고 가위부재 형성 시 부재의 길이가 거의 같아서 실제 구조물을 제작하기에 편리하고, Snapping이 일어나지 않기 때문에 안전하여 Mock-up test model로 이용한다. 그리고 적은 인원으로 원활하게 전개하기 위해 전기실린더 및 베어링을 이용한다. Meridian grid는 가로, 세로 끝에 grid가 모이고, 중심점을 기준으로 x축과 y축을 평면에 투영했을 때 직각을 이루게 된다<Fig. 2>.

Grid의 특성상 <Fig. 2>에서 a와 같은 회전을 요구하기 때문에 그에 맞는 디테일한 Joint를 개발이 필요하고, Mock-up test를 통해 문제점을 고찰하여 해결방안을 제시하고자 한다. 또한, 실제 건축과정에 적용하기 위한 기술적 사항들에 대해 기술한다.

<Fig. 2> Meridian grid

2.1 실험모델의 개요

Meridian grid를 가지고 가위부재를 형성하여 Mock-up test를 실시하였다. Test model의 개요는 다음과 같다.

- Test model의 크기: 2m×2m×0.6m
- 사용 재료: 스테인리스 스틸(Stainless Steel)
- 부재 크기: 15mm×15mm×1.4mm

<Table 1> Mock-up test of the material

Material	Modulus of elasticity		Modulus of rigidity		Poisson's ratio	Weight density	Mass density	Specific gravity
	Mpsi	Gpa	Mpsi	Gpa		kg/m ³	Mg/m ³	
Stainless steel	27.5	189.6	10.7	74.1	0.28	0.127	7.8	7.8

(c) Bird eye's view

<Fig. 3> Meridian model

<Fig. 3>은 Meridian grid를 이용하여 가위부재를 형성한 Meridian type의 도면이다.

Meridian type은 X축과 Y축선상의 부재 길이는 동일하며, 전개과정에서 Joint와 Pivot에 회전이 생기지 않아 Joint와 부재 사이에 응력이 발생하지 않지만, 나머지 축선상의 부재 길이는 다르고 전개과정에서 Joint와 Pivot에 회전이 생겨 Joint와 부재 사이에 응력이 발생한다.

2.2 접합부 개발

Meridian grid는 특성상 Joint부분에 좌우 및 상하에 각도변화가 발생하기 때문에 전개구조물의 원활한 전개를 위해서 1축회전 Joint와 자유회전 Joint

로 2가지 형식을 제안한다.

〈Fig. 4〉 Angular variation of meridian grid

〈Fig. 5〉에서 ●는 Joint부분에 상하 각도변화만 생기기 때문에 조인트와 부재가 수직으로 움직임이 가능한 1축회전 접합부를 개발하고, ⊗는 Joint부분에 좌우 및 상하에 각도변화가 생기기 때문에 조인트와 부재가 수직, 수평으로 회전이 가능한 자유회전 접합부를 개발한다.

〈Fig. 5〉 Meridian type of the joint

〈Fig. 6〉은 〈Fig. 5〉에서 Joint부분에 상하 각도 변화만 생기기 부분으로 회전과 직선운동을 하는 1축회전 Joint이다.(●)

〈Fig. 6〉 Joint design-1

〈Fig. 7〉은 자유회전 Joint로 〈Fig. 5〉에서 Joint의 회전을 자유롭게 하기 위한 접합부이다.(⊗)

〈Fig. 7〉 Joint design-2

Meridian type은 전개 시 Pivot 및 Joint부분에 응력이 발생하기 때문에, 이를 해결하기 위해 Joint뿐만 아니라 Pivot의 설계도 중요하다. 〈Fig. 8〉은 Meridian type의 Pivot 디자인이다.

〈Fig. 8〉 Pivot design

구조물에 볼베어링을 사용하여 부재간의 마찰력을 줄이고, 사람의 힘을 들이지 않고도 원활한 전개가 가능하도록 전기실린더를 이용하였다.

〈Fig. 9〉는 전기실린더를 이용한 Mock-up test model의 Unfolding 과정이다.

〈Fig. 9〉 Unfolding process

3. 전개구조물의 구조해석

전개형 구조물은 다른 구조물과는 달리 전개된 형상과 전개과정에 대한 두 가지 해석이 필요하다. 그러나 전개과정에 대한 해석은 비선형 해석으로 인해 형상접근과 직관에 의한 구조해석이 대부분이었다.

Mock-up test를 실시한 Meridian model의 해석을 수행하기 위하여 완전 전개된 상태를 대상으로 하고, Meridian grid는 곡면형상으로 내부에 공간이 생기지만, 다른 모델에 비해 라이즈-스팬비가 현저히 낮아 형태가 매우 불안정하다. 범용 프로그램 이용하여 해석조건을 가정하고, 전개형 구조

시스템의 실용 가능성을 알아보고자 한다. 또한, 전개가 완료된 구조물에 대한 안정화 방법을 제시하고자 한다.

3.1 단위모델(해석방법)

가위형 시스템의 실제거동을 구현하기 위해 가위부재의 모델링 방법을 제안하며, 이를 비교·검토한다. 가위부재는 〈Fig. 10〉과 같은 Joint를 가지고, Pivot에 의해 회전 및 전개가 가능하다. Pivot은 두 부재에 의한 면내 회전이 가능해야 하기 때문에 Pivot의 모델링 방법이 중요한 포인트가 된다.

가위부재의 Pivot에 대한 모델링 방법을 〈Fig. 11〉과 같이 2가지를 제안한다. 〈Fig. 11(a)〉는 가위부재가 움직이지 않는다고 가정하여 두 부재의 교점을 강절로 모델링한 것이며, 〈Fig. 11(b)〉는 두 부재를 어긋나게 배치하고 교점부분에 연결부재를 삽입한 것이다. (b)는 연결부재에 범용연결요소를 이용하여 6개의 자유도를 가진 스프링으로 모델링한다.

〈Fig. 10〉 Member of the association models

(a) Rigid Joint (b) General link Joint

〈Fig. 11〉 Pivot model

3.2 해석모델

해석 모델은 Mock-up test를 실시한 Meridian 모델이고, 절점번호 및 형상치수는 <Fig. 12>와 같다. 절점번호는 상부절점과 하부절점을 나타내기 위해 하부절점은 괄호를 이용한다.

경계조건은 완전 전개된 상태에서 지반에 지지시키게 되며, 지면과 맞닿는 외곽하부 절점들, 즉 #2, #4, #6, #8, #16, #18, #30, #32, #44, #46, #58, #60, #68, #70, #72, #74를 지점으로 하고, 전개구조물이 영구구조물이 아닌 점, 시공성 등 실제적인 면을 고려하여 경계조건을 핀으로 설정한다. 하중조건은 상부절점들, 즉 #1, #3, #5, #7, #9, 11, #13, #15, ..., #59, #61, #63, #65, #67, #69, #71, #73 37개의 절점에 적용한다. 구조물에 적용한 부재는 모두 동일하게 □-15.0×15.0×1.40(mm)을 사용하고, 재질은 스테인리스 스틸로 설정한다.

(a) Plan

(b) Shape dimension

<Fig. 12> Meridian type

3.3 안정화 방안

전개형 구조물은 불안정 구조물이므로 2차 부재를 이용해서 안정화 방법이 필요하다. 최소의 부재를 사용해서 안정화 시킬 수 있는 최적의 방안을 찾고, Mock-up test를 실시한 Meridian type에 외부 링의 설치 유무에 따른 처짐 제어 효과를 알아보고자 한다. 외부 링은 부재와 같은 스테인리스 스틸에 □-15.0×15.0×1.40(mm)을 사용한다.

가위부재의 Pivot은 Rigid Joint, General link Joint로 모델링하여 해석한다. 여기서, 기본 Meridian type을 M type, Meridian type에 외부 링을 추가한 것을 MB_1, MB_2 type이라 한다.

(a) M-type

(b) MB_1 type

(c) MB_2 type

<Fig. 13> Stabilization method

<Table 2>는 외부 링 설치 효과에 따른 해석 결과이다. 외부 링을 설치하였을 경우 Rigid Joint는 설치하기 전보다 약 17%정도 처짐이 감소하고, General link Joint는 설치하기 전보다 약 26%정도 처짐이 감소한다. 외부 링을 설치하였을 경우는 설치하기 전보다 약 21%정도 처짐이 감소하는 것을 알 수 있으나, 처짐 제한 $L/100=48\text{mm}$ 를 만족하지 않아 설치효과가 미미하다.

<Table 2> The maximum vertical deflection

	Rigid Joint	General link Joint	
M-type	199	291.79	46.63
MB1-type	172.2	228.7	32.81
MB2-type	159.7	201.76	26.37

Mock-up test를 실시한 Meridian type에 최소의 보강부재를 추가하여 안정화시킬 수 있는 최적의 방안을 제시하고 그에 대한 효과를 비교·검토하고자 한다.

Meridian type은 대칭이기 때문에 총 12개의 절점을 선택하여, 이 절점에 대한 최대 수직처짐 값을 비교한다. 처짐이 많이 발생하는 곳을 위주로 안정화시키고자 한다. <Fig. 14>는 12개의 절점 위치 및 번호를 나타낸 것이고, 상부절점과 하부절점을 나타내기 위해 하부절점은 괄호를 이용한다.

<Fig. 14> Meridian type of the node number

<Fig. 15> Comparison of nodal deflections

<Fig. 15>는 General link Joint로 모델링한 처짐 비교 값이고, 절점 #38, #37, #24, #23... 등의 순으

로 처짐이 많이 발생하는 것을 알 수 있다. Rigid Joint로 모델링 하였을 경우에도 처짐이 많이 발생하는 위치는 같다. 처짐이 많이 발생하는 곳을 위주로 안정화시키기 위해 <Fig. 16>의 3가지 안정화 방안을 제안하고 해석을 수행한다. 선은 수평보강부재, 점은 수직보강부재를 나타낸다. 보강부재는 부재와 같은 스테인리스 스틸에 □ -15.0×15.0×1.40(mm)을 사용한다.

(a) MB_3 type

(b) MB_4 type

(c) MB_5 type

<Fig. 16> Stabilization method

<Table 3> The maximum vertical deflection

	Rigid Joint	General link Joint	Number of members
MB_3 type	92	158.46	5
MB_4 type	65.79	129.95	8
MB_5 type	39.88	127.6	12

<Table 3>은 안정화 방법에 따라 MB_3, MB_4, MB_5를 Rigid Joint와 General link Joint로 모델링하였을 때 처짐을 비교한다. Rigid Joint로 모델링 하였을 경우 MB_3은 5개의 부재를 사용하여, 기본 Meridian type인 M type보다 53.76% 안정화를 시켰고, MB_4는 8개의 부재로 66.93%, MB_5는 12개의 부재를 사용하여 79.95% 안정화 시켰다. General link Joint로 모델링 하였을 경우 MB_3은 5개의 부재를 사용하여 기본 Meridian type인 M type보다 45.69% 안정화를 시켰고,

MB_4는 8개의 부재로 55.46%, MB_5는 12개의 부재를 사용하여 56.26% 안정화 시켰다. MB_5는 12개의 부재를 사용했음에도 불구하고 효과는 MB_4와 같은 효과를 나타낸다.

4. 결론

본 논문에서는 전개형 구조물을 개발하고 Mock-up test를 통해 전개가능성을 알아보고, 모델링 방법을 고찰하여 전개 후 안정화 방법을 제안하였다. 그 결과는 다음과 같다.

Meridian type은 Grid의 특성상 조인트의 회전이 발생하기 때문에 그에 맞는 조인트를 제안하였고, 자동으로 전개하기 위해 전기실린더의 새로운 시스템을 도입하였다.

전개형 구조물을 해석하기 위해서 가위부재 모델링 방법을 2가지 제안하였고, 그 결과 Rigid Joint가 General link Joint에 비해 처짐이 약 46.68%로 작게 나왔다. 그러나 완벽한 가위부재의 거동은 아니며, 향후 비선형 거동을 포함한 가위형 요소의 개발이 필요하다.

전개형 구조물을 이용한 Meridian type의 경우, 구조적 안정성 검토를 통하여 충분히 만족시킬 수 있음을 알 수 있었다. 단, 향후 최적의 라이즈-스팬비의 설정, 지지점의 부여 및 적절한 단면의 설정 등에 대해서는 추가적인 검토가 수행되어야 함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 건설교통기술 촉진사업의 연구비지원(과제번호: 11첨단도시 C14)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Pinero, E. P., A Reticular Moveable Theatre, The Architects' Journal for August 30, 1961, p.299.
2. Zeigler, T. R., Collapsible self-supporting structures, US Patent No.4,437,275, 1984(filed August 7, 1981)
3. Escring, F., Expandable Space Structure, Space Structure Journal, vol.1, No.2, 1985, pp.79~91.
4. Gantes, C. J., Deployable Structure, National Technical University of Athens, Greece, Wiley Press, U.K., 2001.
5. 한상을, 이상주, "전개가능 구조물의 형상탐색 및 전개과정에 대한 비선형 해석," 대한건축학회 논문지, 제21권, 9호, 2005.09., PP.45-53
6. 최은미, 이주나, 박찬수, "시저스 전개형 구조의 형상변화와 구조특성," 한국공간구조학회지, 제8권, 4호, 2008.08., PP.57-64
7. 김승덕, 이장복, 박선경, 장제필, "전개구조시스템을 이용한 소형 돔 구조물 개발에 관한 연구," 한국공간구조학회 춘계학술발표논문집, 제9권, 1호, 2013., PP81-82
8. 박선경, "가위형 구조시스템을 이용한 전개형 구조물의 안정화에 관한 연구", 세명대학교 석사학위논문, 2014.

(접수일자 : 2014년 02월 07일)

(심사완료일자 : 2014년 02월 28일)

(게재확정일자 : 2014년 03월 05일)