

## 관입형 텐서그리티 구조시스템의 개발 및 공간구축을 위한 구조특성 분석

### A Development of Intersecting Tensegrity System and Analysis of Structural Features for Forming Space

이 주 나\*  
Lee, Juna

宮里直也\*\*  
Miyasato, Naoya

齋藤公男\*\*\*  
Saitoh, Masao

#### Abstract

In this study, Intersecting Tensegrity System that is integrated solid compression members with tension members was presented. This system is set up by connecting upper and lower compression members of pyramid shape with exterior tension members. In this system, the solid compression members are intersected each other and connected by a tension member in the center. This system is a variation of Tensegrity system, has a improved feature that the system is able to induce prestresses in all of tension members easily by adjusting the distance of a tension member in the center.

The proposed system was studied by modeling, and the structural behavior of the system was investigated by mechanical analysis of the model. Furthermore, the features of the structural behavior variations was investigated when the composition elements(total height, size of surface, intersection length, etc.) are changed variously. It was also showed that the system is able to be used as a temporary space structure system with a membrane roof of inverse conical shape.

**Keywords :** *Intersecting Tensegrity System, Tensegrity, Tension members, Prestress, Structure Design*

#### 1. 서 론

텐서그리티구조는 불연속 압축재를 인장부재로 통합 구성하는 구조시스템으로서, 구조체 구성의 디자인효과가 탁월하고 다수의 인장부재로 인한 여러 이점을 가지고 있는 구조시스템으로 여겨진다. 그러므로 박스민스터 폴리에 의해 도입된 이래, 구조디자인 측면에서도 대공간구조의 기능적 측면에서도 많은 관심을 가지고 텐서그리티 구조의 활용방안이 탐색되고 있다. 우리나라에서는 최초로 텐서그리티 돔이 서울체조경기장에서 도입된 바 있고, 그 외에도 텐서그리티를 활용한 국외 대공간건축물이나 조

형물 등의 사례를 다수 볼 수 있다. 그러나 텐서그리티구조는 압축재를 둘러싸는 인장재에 장력도입과 관리가 어려워, 설계나 시공이 쉽지 않기 때문에 일반적인 건물에서 다양한 방식으로는 사용되지 못했다고 본다.

본 연구에서 제안하고자 하는 관입형 텐서그리티는 인장과 압축부재의 통합제어를 쉽게 하는 아이디어를 도입함으로써 텐서그리티가 가지는 장점을 보다 쉽게 폭넓은 공간구축에 활용할 수 있도록 고안한 구조시스템이다. 일시에 장력을 도입할 수 있는 부재구성을 고안하여 입체 압축재를 인장재로 통합하는 텐서그리티 구조를 손쉽게 얻어낼 수 있으므로, 가볍고 쉽게 해체 건립할 수 있는 공간구조물이 될 수도 있고 다양한 용도의 조형물로도 활용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 관입형 텐서그리티 구조시스템의 구성원리를 단위유닛의 설정을 통하여 보이고 이 구조시스템의 구조거동을 파악하고

\* 교신저자, 정희원, 서울시립대학교 건축학부 객원교수  
Ph.D. Guest Professor, Architectural Department,  
University of Seoul  
Tel:02-6490-2765 Fax:02-6490-2749  
E-mail : juna@uos.ac.kr

\*\* 日本大学工学部 准助教, Member of IASS

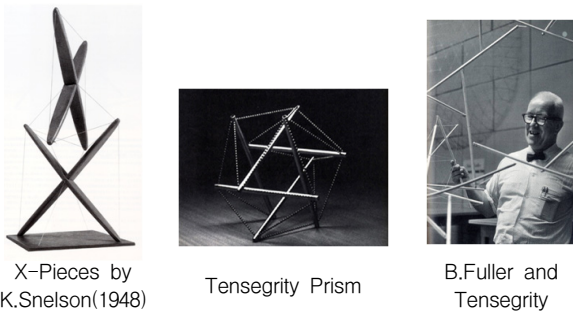
\*\*\* 日本大学 名誉教授, Member of IASS

자 한다. 그리고 기본 관입형 텐서그리티 구조시스템의 구성을 변화시킬 수 있는 다양한 변화요소를 찾아보고 이를 다양하게 조합하였을 때 디자인 변화에 따라 나타나는 구조거동의 변화를 분석하여 건축공간 구축 및 여러 조형 구축에 활용할 수 있는 관입형 텐서그리티 구조시스템의 구조특성을 파악하고자 한다. 또한 건축공간에 활용될 수 있는 관입형 텐서그리티의 가능성을 보다 구체적으로 탐색하기 위하여, 관입형 텐서그리티 구조를 기본 골조로 하고 상부에 지붕막을 조합한 관입형 텐서그리티 막구조를 제안하여 보이고자 한다.

## 2. 텐서그리티 구조와 관입형 텐서그리티 구조시스템

### 2.1 텐서그리티의 발생과 의의

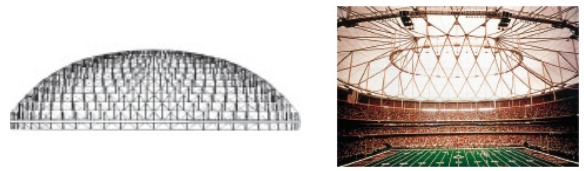
본 연구에서 보이고자 하는 관입형 텐서그리티 구조는 텐서그리티구조에 그 기본을 두고 있다. 텐서그리티 구조시스템의 최초 개발자에 대해서는 여러 논란이 있긴 하지만, 적어도 텐서그리티라는 용어 자체는 1962년 벅스민스터 풀러에 의해 만들어진 조어로 비접촉, 불연속의 원칙을 가진 압축재와 이들을 통합하고 있는 인장재의 결합으로 이루어진 인장통합(Tension Integrity) 구조시스템이란 의미로 소개되었다.



<Fig. 1> Tensegrity's Origin

기본 개념과 구성원리가 완성된 이후에 조각이나 실험적 모델로서 다양한 전개를 보여왔으나, 건축적 공간구축 모델로 가장 유효했던 것은 1964년 풀러가 특허를 취득한 Aspension Dome이라고 할 것이다. 원형의 공간에서 인장후프를 매개로 하여 불연속

압축재를 공중에 띄우듯이 만들어내는 돔 구법으로 이것이 서울체조경기장을 시작해 몇몇의 경기장에서 압도적인 공간감을 가진 경량의 구조로 실현되었다.<sup>1)</sup> 그렇지만 이 돔 구조구법은 인장재에 의해 완전 통합된 시스템이 아니라 외주압축력에 의존하고 있어 텐서그리티로 인정받을 수 없다는 견해도 존재하며, 여러 방향으로 인장력을 도입하는 과정의 난이도가 높고 시공과 유지관리상의 어려움 때문에 여러 규모의 다양한 건축물에 활용되지는 못하고 있다고 본다.



Aspension Dome by B. Fuller(1964) Georgia Dome in Atlanta(1992)





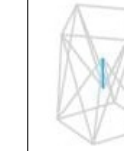
<Fig. 2> Tensegrity Dome

그러나 텐서그리티구조는 적은 체적을 가지는 인장재와 상식을 뛰어넘는 불연속 압축재의 조합으로 인해 아직도 형태조형성에서 매력적인 우위를 가지고 있으며, 압축재를 최소화한 통합 인장체를 추구함으로써 극대화된 경량성 효과를 가지고 있다. 특히 이 경량성은 막지붕재와 결합되었을 때 극대화되기 때문에 막구조 텐서그리티 지붕은 대공간 건축물에서 주요한 대안이 될 수도 있다. 뿐만 아니라 인장재가 주도적으로 활용되었기 때문에 구조의 개폐성, 또는 조립성, 이동성 또한 기대할 수 있는 구법으로도 여겨진다. 따라서 본 연구에서 제시하고자 하는 '관입형 텐서그리티 구조(Intersecting Tensegrity Structure)'는 이러한 텐서그리티구조의 장점은 계승하면서도 텐서그리티가 가지고 있는 제작상의 난점을 개선하는 구성방식을 고안하였다는 점에서 텐서그리티 구조의 연장선상에 있는 구조시스템이라 소개할 수 있다.

### 2.2 관입형 텐서그리티 유닛

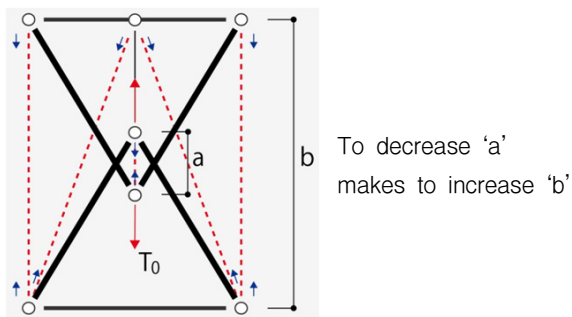
텐서그리티의 원칙을 지키고 장점은 가져가면서도 장력도입을 손쉽게 취할 수 있는 구법으로 고안된 관입형 텐서그리티 유닛은 다음 그림과 같이 불연속 2 개의 입체형 압축재와 3 가지의 인장재로 구성된다.

<Table 1> Members of Intersecting Tensegrity Unit

Compression Members			
	Isolated Diagonal Truss (DT)		
Tension Members			
	Horizontal Truss (HT)	Diagonal String (DS)	Hanger String (HS)

관입형 텐서그리티 구조는 그림에서 보인 것처럼, 상하부 입체압축재(DT)가 직교 관통하여 중앙에 위치한 인장재(HS)에 연결된다. 자중을 포함한 상부에서 가해지는 힘은 상단에 있는 입체압축재로 가해질 것이며 이것은 삼입인장재에 걸려서 하부에 있는 압축재로 전달된다. 접합은 모두 회전을 허용하는 접합으로 이 3 개의 부재로만은 불안정하나, 외측에 압축재 단부를 서로 연결하는 경사브레이스(DS)와 수평인장재(HT)들이 연결됨으로써 전체 부재들이 인장통합체로서 거동하게 된다.

중앙에서 상하부 압축재가 연결되는 부분에 삼입인장재(HS)를 설치하였는데, 이 인장재에 장력을 도입해 거리(<Fig. 3>의 (a))를 줄여주면 외측의 거리 (b)는 증가해 경사브레이스에 인장력이 도입되게 된다. 삼입인장재의 설치를 통해 불연속, 비접촉 압축재, 인장통합이라는 텐서그리티의 원리를 실현함은 물론, 외측의 장력도입을 매우 손쉽게 얻어낼 수 있게 하는 것이다(<Fig. 3>참조).



<Fig. 3> The Flow of Force and Induction Process of Tension Force in Intersecting Tensegrity Unit

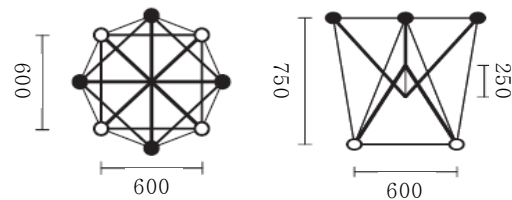
### 2.3 관입형 텐서그리티 유닛의 축소모델 제작

본 연구에서 소개하는 관입형 텐서그리티 구조유닛의 기본 아이디어에 대한 실효성과 구조성립을 검토하기 위해, 넓이 600mm에 높이 750mm 크기의 모델을 제작하여 구조시스템의 성립을 확인하였다.<sup>2)</sup> 축소모델에 사용된 제원은 다음 표와 같다.

<Table 2> Properties of Members in Intersecting Tensegrity Unit Model

Member List	Area (mm <sup>2</sup> )	Length (mm)	Weight (N/mm)	Elastic Modulus (N/mm <sup>2</sup> )
DT Aluminum pipe φ 20, t=2mm	59.7	755	2.7E-5	7.0E+4
HT Aluminum pipe φ 10, t=2mm	28.3	600	2.7E-5	7.0E+4
DS Strand Rope D=2mm	1.7	1051	7.87E-5	1.4E+5
HS Stainless Screw D=4mm	12.6	250	7.87E-5	2.1E+5

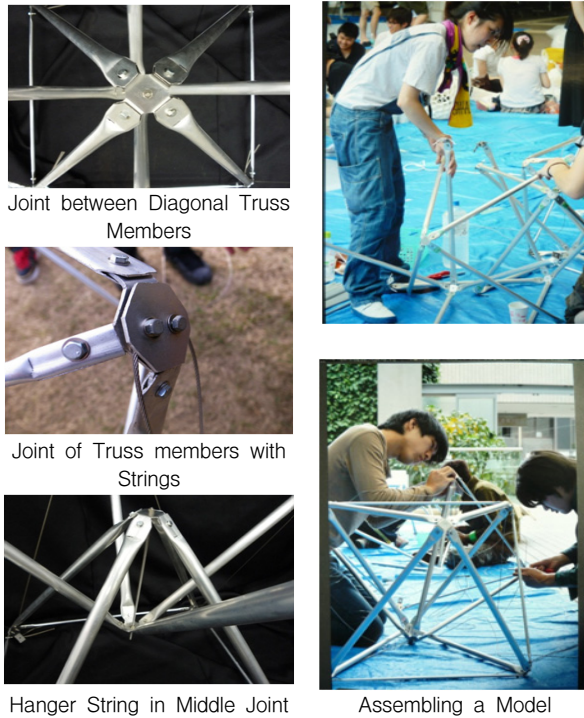
상하의 동일한 사이즈의 경사 압축트러스재(DT)를 이용하여 유닛을 설정하는 것으로 계획하였는데, 하부 DT를 밑변이 600mm를 가지는 정사면체의 모양이 되게 고안하고, 그리고 그와 동일한 DT부재를 상부에서는 90° 회전시켜 압축재가 서로 연속되지 않도록 구성시켰다. 그리고 DT의 각 외곽부 꼭지점은 가는 스트랜드 로프를 이용하여 연결하고, 중앙부는 HS부재에 걸도록 고안하였는데, 이때 HS부재는 길이조정을 통하여 이 모델 전체에 장력을 도입하는 기능을 수행해야 하므로, 축소 실험모델에서는 긴 나사를 이용하여 손으로 길이조정을 통해 장력을 도입하는 방식을 취하였다. 모델의 크기와 구성형상은 다음 그림과 같다.



<Fig. 4> Model of Intersecting Tensegrity Unit

모델의 구성에서는 각 부재의 선정과 형상 결정 못지않게 손쉽게 여러 부재를 연결할 수 있는 디테일 또한 고안되었는데, 다음 사진에서 나타난 바와 같이 쉽게 해체조립이 가능할 수 있도록 디자인하였다. 상하부 입체압축재가 연결되는 중앙의 DT부재의 접합부는 여러 파이프를 연결할 수 있도록 만들어진 관형의 접합부를 고안하고, 여기에 미리 구

멍을 뚫어 중앙에 본 모델에서 가장 핵심적인 역할을 하는 긴 나사(HS)를 긴결할 수 있도록 하였다. 이를 통해서 본 시스템에서 의도한 바와 같이 조립과 장력도입에 용이한 텐서그리티 구조를 구축할 수 있음을 확인하였다.



<Fig. 5> Details of Intersecting Tensegrity Unit Model

### 3. 관입형 텐서그리티 단위유닛의 구조거동

본 장에서는 상기와 같이 설정한 관입형 텐서그리티 기본 유닛모델의 역학적 거동을 파악하고자 한다. 적정 가용공간을 구성할 수 있는 단위유닛 모델을 그림과 같은 규모로 결정하고(<Fig. 6> 참조), 이 모델에 가설건축물로서 예상되는 수직하중과 수평하중을 적용하여 그에 따라 나타나는 구조거동을 조사하였다. DS부재에 도입하는 PS력은 수직하중과 수평하중을 적용하였을 때, 최소부재력을 보이는 DS부재에 1.0KN의 인장력이 발생하는 것을 기준으로 결정하였다.

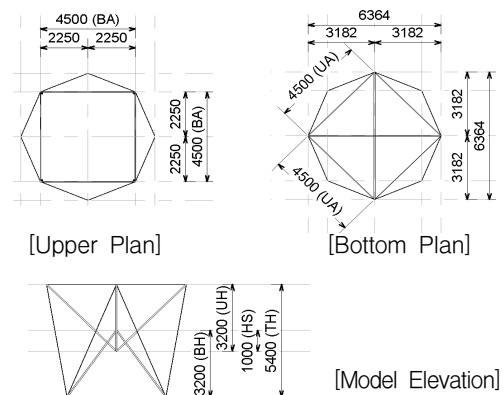
해석결과, 각 부재의 역학적 거동은 설정된 관입형 텐서그리티 구조시스템의 원리에 근거하는 인장 또는 압축거동을 보였다. 기본모델의 부재는 해석을 통해 규모와 하중에 적합한 부재로 설정되었는데

(<Table 3>의 음영부분), 이에 더하여 각 부재의 강성에 따른 부재력 변화를 파악하기 위하여, 다음 <Table 3>과 같이 HS를 제외한 부재의 단면적을 변화시키고 그에 따른 부재력의 변화를 고찰하였다.

<Table 3> Analysis Results of Basic Intersecting Tensegrity Unit Model

No	Members				PS (KN)	Displacement (mm)			DT (KN)		HT (KN)	HS (KN)
	DT	HT	DS	HS		DZ	DXYZ	Upper	Bottom			
1			SR20	SR39	75.0	-6.49	9.17	-65.1	-65.7	33.3	186.0	
2	114.3 X3.2	60.5X 2.3	SR24	SR39	98.5	-6.23	7.95	-65.1	-65.8	33.3	186.2	
3			SR30	SR39	141.5	-6.00	7.05	-65.1	-65.7	33.3	186.0	
4	139.8 X3.6	60.5X 2.3	SR20	SR39	65.0	-5.50	8.49	-64.9	-65.8	33.2	186.1	
5			SR24	SR39	84.0	-5.23	7.19	-64.9	-65.8	33.2	186.1	
6	165.2 X4.5	76.3X 3.2	SR20	SR39	53.5	-4.20	7.22	-65.4	-66.8	33.6	188.6	
7			SR24	SR39	67.5	-3.96	5.86	-65.5	-66.9	33.6	188.7	
8	165.2 X4.5	114.3 X3.2	SR20	SR39	52.0	-4.02	6.88	-65.7	-67.1	33.7	189.3	
9			SR24	SR39	65.2	-3.75	5.51	-65.7	-67.0	33.7	189.2	
10			SR30	SR39	89.7	-3.50	4.50	-65.7	-67.1	33.7	189.4	

표에 나타난 바와 같이(No.1,4,6,8 참조) 강관으로 설정한 DT와 HT의 부재가 커지면 요구PS력이 감소하고 변형도 감소하는 경향을 보인다. 상하부에서 사각뿔을 구성하고 있는 DT와 HT부재가 강성이 커진다는 것은 꼭짓점에 집중되는 하중에 대해 저항력이 커진다는 의미이기 때문에 이에 따른 감소현상이라 보인다. 동일한 DT와 HT부재에서도 DS부재를 증가시킨 경우(No.1,2,3참고)에는 HS부재력에는 변화가 없지만, 변형은 감소하고 요구PS력이 증가하는 것이 파악된다.



Members :

DT 139.8×3.6 / HT 60.5×2.3 / DS SR24 / HS SR39

<Fig. 6> Figure of Basic Intersecting Tensegrity Unit



#### 4. 구성요소 변화에 따른 관입형 텐서그리티 구조의 전개가능성

관입형 텐서그리티 모델을 다양한 용도와 의도에 따라 활용하기 위하여 구성변화의 가능성을 고려하고 이에 따른 구조거동의 변화를 파악하고자 한다.

이 모델의 주요 구성변수(parameter)로는 HS길이(HS), 전체높이(TH) 및 상하부평면형의 크기(BA, UA), 상하부 입체트러스의 각 높이(BH, UH) 등이 될 수 있을 것으로 보고 이를 변화시켜 다음 표와 같이 16

개의 모델을 설정하였다. 변수(parameter)가 되는 부분의 부재와 기호 등은 <Fig. 6>에서 나타내었으며, 세부부재 속성 또한 <Fig. 6>에 기입하였다.

그리고 적재하중으로 상부에 1.0KN/m<sup>2</sup>의 수직하중과 측면에 풍하중으로 1.0KN/m<sup>2</sup>의 수평하중을 가정하여 구조해석을 수행하였다. 그리고 1.2D+1.3WL+PS의 하중조합 상에서 최대부재력을 보이는 DS부재가 1.0KN의 인장력을 가질 수 있도록 PS력을 설정하여 관입형 텐서그리티 모델의 변화가능성을 탐색하였다.

<Table 4> Properties of Intersecting Tensegrity Models for Parametric Analysis

Model Feature	Name	IMAGE	Parameter (shaded part)	Bottom Truss			HS	Upper Truss			Total Height (TH)				
				Plan (BA)	Height (BH)	Member Length	L	Plan (UA)	Height (UH)	Member Length					
Upper and Bottom Equal Truss : Volume Variation	B-1 (BASIC)		-HS Length -Total Height	4500	3200	4513	1000	4500	3200	4513	5400				
	S-1						1500				4900				
	L-1						500				5900				
	S-2		1000				3182				3912	6112			
	L-2						5114				2700	4900			
Upper and Bottom inequal Truss : Volume Variation	S-3		-Upper Truss Plan Length	4500	3200	4513	1000	4500	3200	4513	5400				
	L-3											6364	5522		
	S-4		-Total Height									4500	2700	4173	4900
	L-4												3700	4880	5900
Upper and Bottom inequal Truss : Volume Constant	B-2		-HS Length	4500	3200	4513	1000	4500	2700	4173	5400				
	B-3											1500	3700	4880	
	B-4		-Upper and Bottom Truss Height									4400	5430	2000	3758
	B-5											2700	4173	3700	4880
Upper and Bottom inequal Truss : Volume Constant	B-6		-Upper Truss Plan Length -Upper Truss Height	4500	3200	4513	1000	4500	5523	2200	4482	4400			
	B-7								5000	2700	4448	4900			
	B-8								4120	3700	4710	5900			

#### 4.1 모델의 체적변화에 따른 전반적 거동변화

설정된 전체모델의 해석결과를 <Table 5>에 나타내었다. 전반적으로 체적이 증가하도록 설정된 모델들의 전체적인 해석결과 추이를 보면, 체적이 증가함에 따라 HS부재의 인장력이 증가하는 것을 알 수 있다. 동일한 체적(표에서 S, B, L로 구분)에서는 유사한 HS력을 보이는데, 체적변화요소 중에 높이의 영향이 큰 것으로 파악된다(B-6, B-7, B-8참조). 같은 체적안에서 HS의 길이를 변경하거나 압축재의 각을 변화시켰을 때 HS에는 영향이 없었다.

또한 체적이 증가함에 따라 요구PS력 및 각 부재력이 증가하고 상단의 최대 수직변형 역시 증가함을 보인다. B-6(B-7), B-4, L-2의 경우는 이례적으로 큰 부재력을 보이는데, 이것은 체적요소 외에도 상부압축재의 깊이(UH/UA)가 적은 것이 영향을 미친 것으로 보인다. 반면에 동일한 특성으로 상부압축재 깊이가 깊어진 B-5와 B-8은 이례적으로 작은 부재력을 보이는 것을 확인할 수 있다.

<Table 5> Results of Parametric Analysis on 16 models

NAME	UA X TH	TH/UA	UH/UA	BH/BA	PS (KN)	D (mm)	DT(KN)		HT (KN)	HS (KN)	
							U-DT	B-DT			
S (Small Volume)	S-3	17.2	1.7	1.0	0.7	49.7	-2.4	-39.0	-45.9	19.9	129.5
	S-2	19.5	1.9	1.2	0.7	56.5	-2.8	-45.5	-56.7	20.6	160.0
	S-1	22.1	1.1	0.7	0.7	78.2	-4.7	-55.6	-56.6	28.5	159.9
	S-4	22.1	1.1	0.6	0.7	80.5	-4.8	-61.1	-56.6	33.7	159.9
B (Basic Volume)	B-6	24.3	0.8	0.4	0.7	<b>128.2</b>	<b>-9.1</b>	<b>-86.3</b>	<b>-60.6</b>	<b>50.2</b>	<b>171.1</b>
	B-7	24.3	1.0	<b>0.54</b>	0.7	<b>97.5</b>	<b>-6.5</b>	<b>-73.2</b>	<b>-63.5</b>	<b>40.1</b>	<b>179.5</b>
	B-1	24.3	1.2	0.7	0.7	82.5	-5.1	-65.2	-66.1	33.40	186.9
	B-2	24.3	1.2	0.6	0.7	85.0	-5.3	-71.5	-66.0	39.4	186.7
	B-3	24.3	1.2	0.8	0.7	83.5	-5.2	-61.0	-66.3	29.0	187.3
	B-4	24.3	1.2	0.4	1.0	<b>113.2</b>	<b>-7.4</b>	<b>-86.9</b>	<b>-57.7</b>	<b>52.9</b>	186.4
	B-5	24.3	1.2	0.8	0.6	<b>80.0</b>	<b>-4.9</b>	<b>-60.9</b>	<b>-72.5</b>	<b>29.0</b>	186.9
	B-8	24.3	1.4	0.9	0.7	<b>76.8</b>	<b>-4.6</b>	<b>-62.1</b>	<b>-69.6</b>	<b>29.4</b>	<b>197.5</b>
L (Large Volume)	L-2	25.1	1.0	0.5	0.7	<b>101.5</b>	<b>-6.9</b>	<b>-76.0</b>	<b>-65.0</b>	<b>41.6</b>	<b>183.7</b>
	L-1	26.6	1.3	0.7	0.7	86.0	-5.5	-75.5	-76.4	38.6	216.1
	L-4	26.6	1.3	0.8	0.7	87.0	-5.6	-70.6	-76.6	33.6	216.5
	L-3	34.4	0.8	0.5	0.7	150.5	-13.2	-117.5	-97.0	59.5	274.5

#### 4.2 세부 구성요소 변화에 따른 거동특성

전반적인 체적변화 외에도 다양한 구성요소의 변화가 구조거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 모델의 해석결과를 요소변화 별로 세분하여 <Table 6, 7>에 나타내었다.

먼저, S-3과 L-3은 상부지붕에 해당하는 상부변 길이(UA)를 증가시킨 경우이다. 지붕면적이 커지면서 하중이 증가하므로 당연 모든 부재력과 PS력이 증가하며 변형도 커지는 양상을 보인다. 상부 변이 커지면서 상부압축재의 깊이(UH/UA)가 감소하는 영향도 있을 것으로 생각된다(<Table 6>의 상단 참조).

또한 S-4와 L-4는 전체 높이만을 증가시킨 모델인데, HT의 부재력은 차이가 없었고, 전체높이가 증가함에 따라 요구PS력 및 다른 부재의 부재력이 증가했다. 특히 HS부재력의 증가가 두드러진다. 상부압축재의 깊이가 증가하는 구성임에도 불구하고 HS부재력은 증가하였다(<Table 6>의 중단 참조).

S-1과 L-1모델은 높이변화를 의도한 것이나, 이번에는 압축재의 깊이는 고정하고 전체높이만 변화하도록 한 것이다. 압축재의 깊이가 동일하고 상부면적 증가가 없이 높이를 증가시킨 경우에도 HS부재력이 증가하였다. 이러한 모델구성은 높이가 증가함에 따라 HS부재깊이가 감소하게 되는데, HS 길이가 감소되면서 HT부재력에 변화가 발생했다(<Table 6>의 하단 참조). 특히, 높이는 같으면서 HS깊이가 다른 S-1과 S-4를 비교해보면 HS깊이가 더 긴 S-1의 경우, HS부재력은 동일하나 모든 부재력이 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 동일한 현상을 역시 전체높이가 같고 HS깊이가 다른 L-1과 L-4의 결과에서도 비교하여 볼 수 있다. 따라서 HS의 길이는 길어질수록 HS를 제외한 다른 부재의 부재력 감소를 가져오는 것으로 보인다.

이러한 HS길이 변화에 따른 영향은 B-1, B-2, B-3의 모델에서 분명하게 비교할 수 있다. 이 모델들에서 모든 체적을 동일하게 하고 HS길이를 변화시켰다. HS깊이가 증가해도 HS부재력은 변화가 없으나, 역시 요구PS력을 비롯한 부재력이 감소한다. 모델구성상 상부트러스 깊이가 커지게 되므로, 부재력 감소에 영향을 주었을 것으로 생각된다(<Table 7> 상단 참조).

<Table 6> Behavior of Intersecting Tensegrity Unit with Variation of Upper Truss Plan Area / Total Height / Variation of Total Height and HS Length

Parameter	Name	Image	UH/UA	BH/BA	Behavior Increase(↑), Decrease(↓)	PS (KN)	D (mm)	DT(KN)		HT (KN)	DS (KN)	HS (KN)
								U-DT	B-DT			
-Upper Truss Plan Length	S-3		1.0	0.7	-Roof area Increase(↑)	49.7	-2.4	-39.0	-45.9	19.9	1.0	129.5
	B-1 (basic)		0.7	0.7	-Upper Truss Depth Decrease(↓)	82.5	-5.1	-65.2	-66.1	33.4	1.0	186.9
	L-3		0.5	0.7	-PS Force / All Member Force(↑) -HS Force(↑)	150.5	-13.2	-117.5	-97.0	59.5	1.0	274.5
-Total Height	S-4		0.6	0.7	-Total Height(↑) -Upper Truss Depth(↑)	80.5	-4.8	-61.1	-56.6	33.7	1.0	159.9
	B-1 (basic)		0.7	0.7	-PS Force / Truss Force(↑)	82.5	-5.1	-65.2	-66.1	33.4	1.0	186.9
	L-4		0.8	0.7	-HT Force Constant -HS Force(↑)	87.0	-5.6	-70.6	-76.6	33.6	1.0	216.5
-HS Length -Total Height	S-1		0.7	0.7	-Total Height(↑) -HS Length(↓)	78.2	-4.7	-55.6	-56.6	28.5	1.0	159.9
	B-1 (basic)		0.7	0.7	-PS Force / All Member Force(↑) -HS Force(↑)	82.5	-5.1	-65.2	-66.1	33.4	1.0	186.9
	L-1		0.7	0.7	-PS Force / All Member Force(↑) -HS Force(↑)	86.0	-5.5	-75.5	-76.4	38.6	1.0	216.1

B-4, B-1, B-5는 외부체적은 동일한 상태에서 내부 연결점 위치를 변화시켜 상하부 압축재의 깊이를 변화시킨 경우이다. HS부재력은 변화가 없는 것으로 나타나나, 상부압축재 깊이가 커지고 동시에 하부압축재 깊이가 줄어드는 경우 부재력이 큰 폭으로 감소함을 알 수 있다(<Table 7> 중단 참조).

S-2, B-1, L-2모델은 상하부 동일한 압축트러스 부재로 구성된 경우, 필요에 따라서 상부압축재의 각을 변화시켜 상부면적을 증가시킬 수 있는데, 이러한 경우를 가정한 것이다. 이 경우는 그림에서 알 수 있는 것처럼 전반적으로 체적증가 양상이다. 따라서 부재력이 커지며, 특히 L-2의 경우에는 상하부 트러스의 부재력이 전도된다(<Table 7>의 하단 참조). 그리고 <Table 5>에서 알 수 있듯이 상부압축재의 깊이가 0.6이하로 되는 경우에는 상하

부 압축재의 부재력이 전도되어 상부압축재의 부재력이 더욱 증가하는 것을 알 수 있다.

### 5. 막지붕을 가진 관입형 텐서그리티 구조의 거동

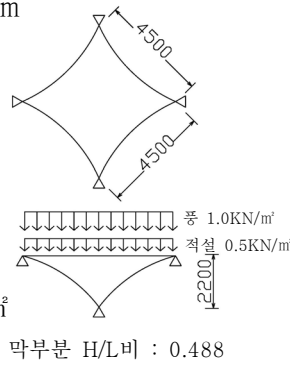
막지붕을 설치하여 가설 공간구조물로 사용할 수 있는 가능성을 파악하기 위하여, 관입형 텐서그리티 단위모델(기본형 유닛(B-1)) 상부에 역호른형의 막지붕을 설정하였다. 그리고 이러한 막구조를 설치한 경우 관입형 텐서그리티 유닛의 구조거동 변화를 탐색하였다.

설정된 막구조의 크기와 형상 및 해석조건은 다음에 보인 내용과 같고, 적용한 하중은 상부에 0.5KN/m<sup>2</sup>의 적설하중과 1.0KN/m<sup>2</sup>의 풍하중이 작

용하는 것으로 고려하였다. 이상의 해석조건으로 해석한 결과를 막지붕이 없는 경우와 비교하여 <Table 8>에 나타내었다.

-막재료(B종)의 해석조건(2D-Solid)요소

- 탄성계수( $E_w$ ) : 1,539,428 N/m
- 탄성계수( $E_f$ ) : 910,349 N/m
- 프와송비( $\gamma$ ) : 0.528
- 전단계수( $G$ ) : 8,600 N/m
- 초기장력 : 2,000 N/m



-케이블(트러스 요소)

- 와이어로프 6  $\phi$  ( $A=14.1\text{mm}^2$ )
- 탄성계수( $E$ ) :  $1.37 \times 10^{11}\text{N/m}^2$
- 프와송비( $\gamma$ ) : 0.3
- 초기장력 : 9,956.5 N

유닛의 내부 중심점과 외측의 4점을 이용해 상부에 역(逆)호른형의 막을 설치하면 막의 장력으로 인해 인장통합체 역할을 하는 외측 DS부재에 인장력이 작용하게 된다. 따라서 <Table 8>에 나타낸 바와 같이 자연스럽게 요구PS력이 감소하며 HT부재의 인장력이 감소하여 관입형 텐서그리티의 구조형성을 돕는다. 그러나 HS부재력이 상승하고 압축부재력도 커지는 것을 알 수 있다. 막부재의 적정 눈하중과 풍하중을 고려하였을 때의 구조거동 또한 설정된 구조체가 저항할 수 있는 범위 안에 있어 막 지붕을 가진 공간구조체로 활용이 가능함을 알 수 있다.

6. 결 론

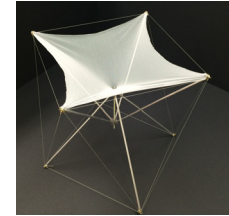
본 연구에서는 텐서그리티 구조의 장점을 가지면

<Table 7> Behavior of Intersecting Tensegrity Unit with Variation of HS Length / Variation of Upper and Bottom Truss Height / Variation of Upper Truss Angle

Parameter	Name	Image	UH/UA	BH/BA	Behavior Increase(↑), Decrease(↓)	PS (KN)	D (mm)	DT(KN)		HT (KN)	DS (KN)	HS (KN)
								U-DT	B-DT			
-HS Length	B-2		0.6	0.7	-HS Length(↑) -Upper Truss Depth(↑) -Upper Truss Length(↑)	85.0	-5.3	-71.5	-66.0	39.4	1.0	186.7
	B-1 (basic)		0.7	0.7	-PS Force / All Member Force(↓) -HS Force Constant	82.5	-5.1	-65.2	-66.1	33.4	1.0	186.9
	B-3		0.8	0.7	-PS Force / All Member Force(↓) -HS Force Constant	83.5	-5.2	-61.0	-66.3	29.0	1.0	187.3
-Upper and Bottom Truss Height	B-4		0.4	1.0	-Upper Truss Depth(↑) -Bottom Truss Depth(↓) -Upper Truss Length(↑) -Bottom Truss Length(↓)	113.2	-7.4	-86.9	-57.7	52.9	1.0	186.4
	B-1 (basic)		0.7	0.7	-PS Force / All Member Force(↓) -HS Force Constant	82.5	-5.1	-65.2	-66.1	33.4	1.0	186.9
	B-5		0.8	0.6	-PS Force / All Member Force(↓) -HS Force Constant	80.0	-4.9	-60.9	-72.5	29.0	1.0	186.9
-Upper Truss Height -Upper Truss Plan Length	S-2		1.2	0.7	-Upper Truss members Rotation -Upper Truss Depth(↑) -Total Height(↓)	56.5	-2.8	-45.5	-56.7	20.6	1.0	160.0
	B-1 (basic)		0.7	0.7	-PS Force / All Member Force(↑)	82.5	-5.1	-65.2	-66.1	33.4	1.0	186.9
	L-2		0.5	0.7	-PS Force / All Member Force(↑)	101.5	-6.9	-76.0	-65.0	41.6	1.0	183.7



<Table 8> Behavior of Intersecting Tensegrity Unit with Membrane Roof

Image	Condition	PS (KN)	D (mm)	DT(KN)		HT (KN)	DS (KN)	HS (KN)	비고
				U-DT	B-DT				
	Without Membrane Roof	82.5	-5.1	-65.2	-66.1	33.4	1.0	186.9	B-1 (basic)
	Only Membrane P.S.	79.0	-4.8	-67.1	-66.1	23.2	1.0	192.5	
	Membrane PS + SL	79.0	-4.8	-68.0	-68.9	20.7	0.9	195.0	
	Membrane PS + Upward WL	79.0	-4.8	-66.1	-63.1	26.2	1.0	189.6	

서도 장력도입을 손쉽게 할 수 있는 관입형 텐서그리티 구조시스템을 제안하고 그 다양한 변화구성에 따른 구조특성을 분석하였다. 그 내용은 다음과 같이 요약된다.

1. 사각뿔모양의 입체형 압축재를 상하부에서 관통시켜 중앙부의 인장재에 연결시키고 압축부재의 주위를 인장재로 연결시키면, 상하부의 입체 압축재를 인장재로만 통합하는 관입형 텐서그리티 구조시스템이 성립된다.
2. 관입형 텐서그리티 구조시스템은 중앙부에 있는 하나의 인장재의 거리조정을 통해 전 인장부재에 장력이 손쉽게 도입되는 특성을 가진다.
3. 관입형 텐서그리티 구조시스템은 체적이 증가함에 따라 요구PS력 및 부재력, 특히 중앙부 인장재인 HS부재의 인장력이 증가한다. 구조 전체높이의 영향이 지배적이며, 동일한 체적 안에서는 HS의 길이를 변화시키거나 압축재의 각을 변화시키는 것이 HS부재력에 영향을 미치지 않는다.
4. 구조체의 높이가 증가하면 요구PS력과 부재력이 증가하는데, 특히 HS력의 증가가 두드러지고, 상하부 수평부재인 HT부재력은 변화하지 않는다.
5. 동일한 체적조건에서 상부압축재의 깊이가 깊어지면 중앙부 인장재인 HS부재를 제외한 부재의 부재력과 요구PS력이 감소한다.
6. HS의 길이가 길어지면 HS의 부재력은 변화가 없지만, 요구PS력을 비롯해 모든 부재의 부재력이 감소한다.

이상과 같은 구조거동 특성을 가진 관입형 텐서그리티 구조에 역호른형의 막지붕을 설치하여 가설

공간 구조물로서의 활용가능성 또한 검토하였는데, DS부재의 해소에 따라서 손쉽게 해체와 건립, 그리고 인장력 도입이 가능한 가설구조물로 활용될 수 있는 가능성을 보인다.

이 구조시스템은 본 연구에서 보인 바와 같이 구성요소의 변화를 통해 다양한 형태로 조합될 수 있고 또한 다양한 마감재와도 결합될 수 있으므로 여러 용도로 활용될 수 있을 것으로 본다. 향후 보다 활용성 높은 방향으로 기본 유닛의 변화가능성을 탐색해 나가고자 한다.

### 감사의 글

This research was supported by Nohmura Foundation for Membrane Structure's Technology(能村膜構造技術振興財団).

이 연구는 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임.(NRF-2012R1A1A3009705)

### References

1. 사이토 마사오, "건축 공간 구조이야기", 기문당, 2005, pp.324~326.
2. 栗栖寛弥 et al., "相互貫入ユニットで形成されたTensegrityTrussの提案及び力学的特性の把握 -タワーへの適用に関する基礎的研究-", 日本大学工学部学術講演会論文集, 2012, 11, pp.115-116.
3. 李珠娜 et al., "相貫型テンセグリティ・トラス・タワーのデザインと施工ーみんなで作く

- る祭災タワーの提案”,日本建築学会大会建築デザイン梗概集, 2013. 8, pp.224-225.
4. 齋藤公男 et al., “テンセグリティ・フラワーの設計と施工”, 日本建築学会大会建築デザイン梗概集, 2012. 9, pp.154-155.
  5. 최선영외 2인, “텐서그리티 모듈의 변형 및 응용에 관한 연구”, 한국셀공간구조학회논문집, 2005. 06, pp.73-80.
  6. 박찬수의 1인, “공간그리드구조 구성유닛의 형태구성”, 한국공간구조학회논문집, 2007. 06, pp. 125-133.
  7. 최선영, “공간 그리드구조의 디자인 요소로서 셀-유닛의 형태와 구성”, 충북대학교 박사학위논문, 2007.

- Received : September 11, 2014
- Revised : November 26, 2014
- Accepted : December 04, 2014