

공간그리드구조 구성유닛의 형태구성

Morphogenesis of Component Unit in Spatial Grid Structure

박 찬 수*
Park, Chan-Soo

최 선 영**
Choi, Sun-Young

요 약

본 연구의 주목적은 공간그리드의 조형요소로서 3차원 유닛의 역할과 구성을 탐구하는 것이다. 따라서 공간그리드와 3차원 유닛의 상호관계와 역할, 유닛의 유형 및 구성방식과 이에 영향을 미치는 요인들이 파악된다. 또한 각각의 형태적 특성 및 조합이 공간그리드 전체의 형상에서 드러내는 효과를 확인하여 전반적인 형태구성의 틀을 제시하고자 한다.

Abstract

The purpose of this study is to investigate the functions and formations of the component units as aesthetic components in the spatial grid. The main subject covered here is the presentation of the morphological method of shaping spatial grid by application of 3-dimensional units satisfying the suitable form of polyhedra, tensegrity and hybrid structure. In accordance with the subject, the definition of the spatial grid and 3-dimensional unit, the relationship between them, and then the functions of those units are reviewed. And the formations of polyhedral units, tensegrity units and hybrid units are generated by means of the modules of the simplest type or pattern. And also the overall appearance of the spatial grid shaped by several basic methods in which one unit can be joined to another and arranged are depicted.

키워드 : 공간그리드, 구성유닛, 다면체, 텐서그리티, 하이브리드

Keywords : Spatial Grid, Component Unit, Polyhedra, Tensegrity, Hybrid

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

건축물에 적용된 공간그리드는 구조형태 자체가 드러나도록 계획되는 경우가 다수이므로, 구조적 합리성을 반영하는 동시에 기술을 기반으로 한 형태구성의 창의성을 발휘하기에 적합한 구조형식이라 할 수 있다. 또한 이와 관련된 기술적 측면의 비약적 발전과 함께, 공간그리드의 조형미에 기울이는 관심 역시 증대되고 있는 추세이다.

그리드 구성방식은 전체 공간그리드의 형상을 결

정하는데 중요한 역할을 하고, 이 방식들 중 하나가 3차원 유닛을 이용하는 것이다. 이 유닛을 구성한다는 것은 자체로 기하학적 소공간(小空間)을 이루는 '조형요소로서의 구조'를 형성하는 것을 의미는 동시에, 공간연속체의 일부를 치환, 소거 또는 부가가 용이한 공간구성의 융통성을 내포한다.

본 연구에서는 공간그리드와 3차원 유닛의 상호관계와 역할을 확인하고, 유닛의 유형 및 구성방식과 이에 영향을 미치는 요인들을 파악하여 기초적인 형태구성의 틀을 제시하고자 한다.

이것은 공간그리드의 형상을 표현하는 조형요소로서 3차원 유닛의 가능성을 확인하는 방안으로 부분에서 전체로 확장되는 형태구성을 보이고자 하는 것으로, 형태를 창조하는 과정에서 디자인과 구조의 상보적(相補的) 관계를 확인하는 것을 목표로 한다.

* 정희원, 충북대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Tel : 011-9735-2432

E-mail : cspark@chungbuk.ac.kr

** 정희원, IESD 책임연구원, 공학박사

1.2 연구방법 및 범위

본 연구에서 대상으로 하는 유닛의 고찰범위는 공간그리드의 구성단위로 적용될 수 있는 독립적 3차원 유닛 형태의 구성에 부합하는 내용으로 제한된다. 따라서 공간그리드 자체의 거동과 이에 영향을 미치는 요인들, 구조재 및 접합시스템과 관련된 사항들은 연구내용에 포함되지 않는다.

먼저 공간그리드의 개념과 구성에 기초하여 3차원 유닛의 역할과 기본성격을 인지하고, 이들 관계 내에서 유닛의 조형방식을 선택한다.

3차원 유닛으로 다면체, 텐서그리드 그리고 하이브리드 유닛을 도입하고, 각각의 특성과 조건들을 확인하여 이를 기반으로 형태구성에 필요한 기본적들을 체계화한다. 또한 공간그리드 전체의 형상에 미치는 영향도 확인한다.

본 연구는 3차원 유닛의 구성에 관한 기초연구로서 위상을 가지며, 게재된 사진과 그림들 중 일부는 참고문헌을 토대로 재편성하였다.

2. 공간그리드와 유닛

2.1 공간그리드의 개념 및 구성

공간그리드는 공간트러스와 같이 힘의 전달경로를 3차원으로 확장시킨 구조형식으로 이해할 수 있지만, 형태학(morphology)의 관점에서 보면 트러스에서 보이는 단위형태의 삼각구성에 의한 확립적 형태를 피할 수 있다는 점에서 공간골조에 가깝다고 볼 수 있다<표 1>.

전형적인 공간그리드는 평행하는 두 그리드 층을 웹재로 상호 연결하여 이루어진다. 이런 복층(혹은 다층) 공간그리드는 본질적으로 3차원 거동을 하

<표 1> 구조형식별 구성조건 및 응력¹⁾

구조형식	구성조건			주응력
	부재	단위형태	접합방식	
공간 트러스	선재	삼각형	핀접합	압축+인장
공간골조	선재	제한 없음	강접합	압축+인장+휨
공간 그리드	선재	제한 없음	핀 / 강접합	압축+인장 (or+휨)

므로 평면(2차원) 구조와 달리 모든 구성부재가 하중을 분담하고 하중전달에 기여하여 구조적 효율성이 높은 것으로 평가된다. 또한 건축계획적 시각에서 보면 확장과 해체가 용이하고 임의 절점에 지지구조를 설치하는 것이 가능해서 공간구성의 융통성이 크다.

공간그리드의 전체 이미지는 단위형태(그리드)에 따라 변하게 되고, 그리드를 구성하는 방식은 크게 두 가지가 있다; 주어진 공간면을 분할하는 것과 유닛의 조합을 통해 면을 채워가는 것. 그러나 단위형태를 구성하는 두 방식은 명쾌하게 경계를 두고 서로 구분되기 보다는 분할의 밀도를 높여가면 일정한 형태의 유닛구성이 가능하고, 한편으로는 특정 유닛의 배열이 공간을 분할한다는 점에서 서로 유기적 관계에 놓여 있다고 할 수 있다.

이런 이유로 3차원 유닛의 개별 형태구성에 관한 세부사항을 다루기에 앞서, 공간그리드의 단위형태를 조성하는 방식 내에서 유닛의 성격 또는 역할을 인지할 필요가 있다.

2.2 유닛의 역할과 조성(造成)

본 연구에서 주목하는 3차원 유닛은 공간그리드의 단위형태가 되고, 조합에 의해 공간그리드의 기본개념을 만족하며 전체 형상을 변화시키는 조형요소로서 역할을 한다. 이것은 유닛 자체가 독자적인 하중전달체계와 기하학적 형태를 가지며 안정화된다는 점에서 평면 유닛과 구별된다.

3차원 유닛 단위형태를 만드는 첫 번째 방법은 면 분할에 의한 단위 평면형을 복층으로 배열하고 웹재(수직 혹은 사재)로 연결하는 것이다. 평면 분할양상이 무수히 가능한 만큼, 평면형의 복층배열에 의한 유닛 형상 역시 셀 수 없이 많을 것으로 가정할 수 있지만, 구조적으로 자립(self-standing) 할 수 있는 형태는 제한적이다.

두 번째 방법은 유닛 자체가 일정한 구조시스템을 따르도록 디자인하는 것이고, 이것은 유닛 내에서 힘의 수용, 전달, 해소가 가능한 형식이 되도록 하는 것이다.

결국 외형 조건의 측면에서 위의 두 방법에 의한

3차원 유닛의 조성은 엄밀하게 구별되지 않지만, 선택된 단위형태의 조성방식은 앞서 언급한 공간구성의 융통성에 영향을 미치게 된다. 따라서 앞으로 본 연구에서 다루는 3차원 유닛은 후자의 방법에 의해 조성된다.

3. 3차원-유닛의 유형 및 구성

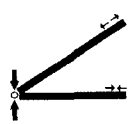

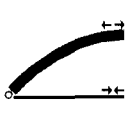

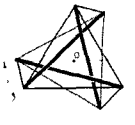

3.1 3차원-유닛의 유형

3차원-유닛이 하나의 형태를 가진 요소로서 자립하기 위한 하중전달체계로 벡터저항(vector-action)과 복합저항(hybrid-action)시스템²⁾, 그리고 인장통합(tensegrity)³⁾ 시스템을 이용할 수 있다.

벡터저항시스템은 압축과 인장응력의 조합으로 하중을 전달하며 다면체 형상의 3차원 유닛에 적합한 구조시스템이 되고, 하중전달방식의 중첩으로 이루어지는 복합저항시스템은 하이브리드 유닛의 구성을 위해 선택된다. 인장재가 연속된 망과 같은 네트워크를 통해 하중을 전달하는데 주 역할을 하여 전 방향 응력이 균형을 이루는 인장통합시스템은 텐서그러티 유닛의 구조시스템이 된다<표 2>.

이렇게 이루어진 3차원 유닛들-다면체, 하이브리드, 텐서그러티 유닛-에서는 모든 부재가 선재로 구성하고 힌지접합으로 연결할 수 있다. 이로 인해 각 부재의 자중에 의한 휨모멘트를 무시한다면, 외력이 절점에 작용하고 주로 축력(인장과 압축력)으로 하중이 전달되며, 모멘트와 같은 비-축력 효과는 부차

<표 2> 유닛의 유형과 하중전달체계

유닛	하중전달체계	구성 예
다면체	 벡터 저항	
하이브리드	 복합 저항	
텐서그러티	 인장 통합	

적인 것으로 간주되는 공간그리드의 특성을 만족시킬 수 있다.

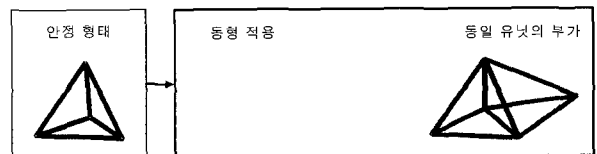
3.2 다면체 유닛의 구성

공간그리드 또는 공간트러스에서 자주 사용되는 다면체 유닛은 4면체(사각피라미드) 형태가 두드러지지만 이것은 매우 제한된 선택을 의미한다. 이외의 다양한 다면체와 그로부터 구성할 수 있는 3차원 유닛의 가능성들은 거의 무한하다고 할 수 있다.

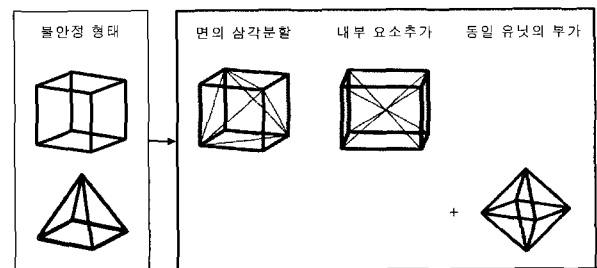
이것은 우선 대상 다면체의 본질적 형태가 가지는 공간안정성⁴⁾을 확인하고, 이로부터 유닛의 형태구성 방식이 결정된다. <표 3>의 예에서 보이는 본래 형태로 안정한 다면체는 안정요소(부재)를 추가할 필요가 없고 자체가 증식하는 형태(유닛 부가)로

<표 3> 다면체의 공간안정성 판정 예

유닛	공간안정성		유실 부재수	비고
	안정	불안정		
프리즘		○	3개 이상	
안티 프리즘	삼각	○	-	8면체
	사각 이상-		○	2개 이상
피라미드	삼각	○	-	4면체
	사각 이상-		○	1개 이상
맞댄피라미드	○		-	
잘린피라미드		○	3개 이상	프리즘 변형



(b) 안정형 다면체



(a) 불안정형 다면체

<그림 1> 다면체 유닛의 구성

형태변화를 피할 수 있는 반면, 불안정 형태의 다면체는 안정화를 위한 부재의 추가가 우선된다.

<표 3>에서 유닛의 공간안정성 조건을 만족하기 위해 필요한 추가 부재수는 다면체의 삼각형을 이루지 않는 n-각형 면과 그 면의 삼각분할을 위한 최소부재수와 관련이 있음을 알 수 있다. 따라서 불안정한 다면체는 이 n-각형 면의 삼각분할 또는 내부안정화 요소의 추가 그리고 동일한 유닛의 부가를 통해 3차원 유닛으로 구성할 수 있다<그림 1>.

3.3 텐서그러티 유닛의 구성

텐서그러티 유닛은 각 절점과 이들에 연결된 그물망 같이 연속한 인장요소의 네트워크에 의해 절점이 고정되지 않은 상태에서도 셀프-스트레스에 의해 자체-균형(self-balance)을 확보할 수 있다.

그러나 시스템에 셀프-스트레스를 도입하기 전 기하학적 형태는 외부하중이 없는 상태에서 정적 안정, 평형상태를 확보할 수 있어야 한다. 따라서 유닛의 기하학적 형태와 요소의 배열은 시스템의 안정에 필요한 조건을 만족시켜야한다⁵⁾.

따라서 텐서그러티 유닛을 구성하기 위해서는 우선 공간그리드의 3차원 유닛으로서 적합한 유형과 범주를 규정할 필요가 있고, 본 연구에서는 유닛이 텐서그러티의 개념을 만족하고 구성이 용이하도록 다음과 같은 조건을 설정한다.

- 1) 기본패턴에 의한 형태구성이 가능하고 공간그리드 형성을 위한 유닛의 연결과 배열이 용이하도록 한다.
- 2) 유닛의 구성요소는 연속 인장-불연속 압축으로 정의되는 텐서그러티 형상의 특징을 최대한 반영한다.
- 3) 역학적 특성을 만족하고 공간안정성 확보가 이미 검증되거나 용이한 형태로 구성한다.

위 조건을 만족하는 유닛 형태는 마름모형 기본패턴⁶⁾에 의해 구성이 가능하고, 다면체 프리즘의 형상이 된다. 마름모형 기본패턴을 이용하여 구성된 프리즘 외형의 텐서그러티 유닛은 T(텐서그러티)-프리즘 유닛으로 부르고, 삼각, 사각, 오각 T-프리즘 등의 일정한 방식으로 명명하고 표기한다.

T-프리즘 유닛은 압축요소를 추가하여 실린더가

<표 4> 삼각 T-프리즘 유닛의 형태변환

상·하부 다각면	절점 위치(압축봉 기준)		
	양단 2 (E2)	내부 2(I2)	단부 및 내부(EI)
동일 (Identity)	I-E2	I-I2	I-EI
상이 (Difference)	D-E2	D-I2	D-EI

될 때까지 거의 무한히 구성할 수 있는데, 상·하부 다각면의 면적이나 측면의 높이는 공간그리드의 규모에 따라 조절이 가능할 것이다. T-프리즘 유닛의 개별 형태는 압축봉과 케이블이 만나는 절점위치와 상·하부 다각면의 규모를 조절하여 크게 6가지로 변화시킬 수 있고, <표 4>는 삼각 T-프리즘 유닛의 형태구성과 변환 양상을 보인 것이다.

3.4 하이브리드 유닛의 구성

케이블구조와 복합되는 하이브리드 구조시스템에 기반한 유닛을 구성하기 위한 개별 구조형식은 케이블, 아치 및 보로 압축되고, 모두 중첩연결⁷⁾ 방식으로 복합된다.

이 구조형식들 중에서 케이블은 인장-저항, 아치는 압축-저항의 대표적인 경우로 각 요소는 연력도(連力圖) 형태로 하중을 전달하며, 보는 휨-저항에 의한 하중전달체계를 갖는 대표적인 예이다. 그러나 이들 개별 구조형식들의 복합으로 3차원 유닛이 구성되면, 하중전달체계는 축력조합으로 전환되고 비-축력 효과는 미미해진다. 또한 수평추력을 자체 내로 흡수하여 별도의 수평 지지구조를 필요로 하지 않는다.

이렇게 구성된 하이브리드 유닛은 <표 5>에 나타

<표 5> 하이브리드 유닛의 구조형식과 거동

유닛		하중전달체계		복합 거동
AC	Arah + Cable	아 치: 압축-저항 케이블: 인장-저항		축력조합 수평추력상쇄 치짐제어
BS C	Beam + Strut + Cable	보: 휨-저항 스트럿: 압축-저항 케이블: 인장-저항		
CS	Cable + Strut	케이블: 인장-저항 스트럿: 압축-저항		

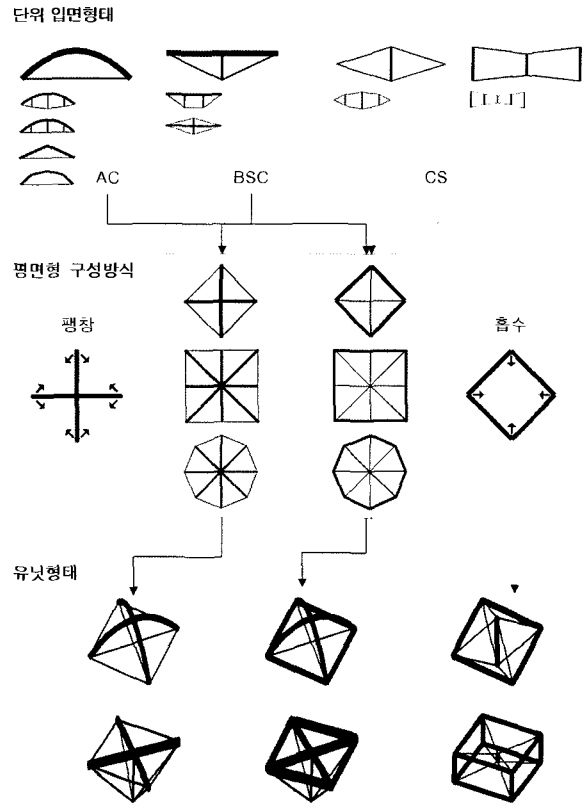
<표 6> 하이브리드 유닛의 구성조건

유닛	단위 입면형태			평면 구성방식	경계프레임
	블록	오목	스트럿		
AC	Y	N	유/무	팽창	연성/강성
BSC	Y	N	유	팽창	연성/강성
CS	Y	Y	유	흡수	강성/정착

낸 바와 같이 각각 아치+케이블(Arch+Cable, 이하 AC), 보+스트럿+케이블(Beam+Strut+Cable, 이하 BSC), 케이블+스트럿(Cable+Strut, 이하 CS) 유닛으로 부른다.

하이브리드 유닛에서 단위 입면형의 배치패턴은 교차형이 되므로 평면형태는 일반적으로 마름모, 장방형, 다각형이 된다. 이때, AC와 BSC 유닛에서는 입면형의 배치에 의해 평면형이 먼저 결정되고 안정요소로서 경계프레임이 필요하지만, CS 유닛에서는 강성 경계프레임에 의한 틀을 따라 입면형이 배치되는 형식을 따른다. 이런 평면형 구성방식은 팽창(expansion)과 흡수(attraction)로 표현된다⁸⁾.

이와 더불어 유닛에 셀의 특성을 부여하는 경계프레임의 소재에 대한 고려가 필요하다. CS 유닛의 경계프레임은 적절한 강성을 가진 부재로 제한하거나, 그렇지 않은 경우는 유닛의 상호연결을 통해 형태를 유지하고 공간안정성을 해치지 않도록 해야 한다. 후자의 경우에는 공간그리드 전체 외곽(혹은 외주)에 접한 유닛이 지주나 수직부재에 정착되



<그림 2> 하이브리드 유닛의 구성

어야 한다. 각 하이브리드 유닛의 단위 입면형태와 평면구성 및 경계프레임의 구성조건은 <그림 2>와 <표 6>에 나타낸 바와 같다.

4. 유닛 조합의 조형특성; 공간그리드

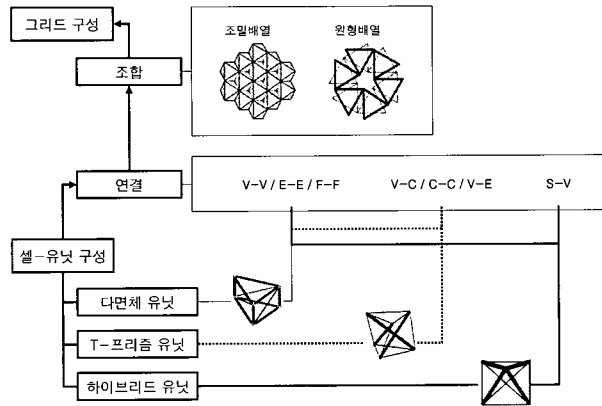
본 장에서는 3차원 유닛의 연결과 조합에 의한 공간그리드의 조형성과 형태구성의 활용성을 보이 고자 한다. 3차원 유닛의 연결 및 조합에 따른 공간 그리드의 조형변화는 각 유닛의 형태적 특성과 이들이 드러내는 기하학적 형상에서 발견된다.

3차원 유닛의 조합에 의한 조형특성 고찰에 앞서, <표 7>에서 각 유닛의 기본특성과 연결 및 조합⁹⁾에 따른 공간그리드 구성방식을 확인하고, <그림 3>에 유닛의 선택과 공간그리드를 구성하는 프로세스를 나타내었다.

각 유닛의 형태적 조형효과를 알아보기 위한 공간그리드 모델은 동일한 규모(길이×폭×높이)로 구성하고, 비교대상으로 하는 각 3차원 유닛의 형태와

<표 7> 유닛의 기본특성과 공간그리드 구성방식

유닛		기본특성		공간그리드 구성		
		안정화 방식	하중 전달체계	연결방식		조합방식
다면체	안정형	자체 안정	벡터저항	V-V E-E F-F		조밀, 가상블록 나선, 원형배열
	부가형	동일유닛부가				
	요소추가형	안정요소추가				
텐서그러티	T-프리즘	셀프-스트레스	인장통합	V-V E-E F-F	V-C C-C V-E	조밀, 원형배열
하이브리드	AC	셀프-스트레스	복합저항	V-V E-E F-F	S-V	조밀, 원형배열
	BSC					
	CS					



<그림 3> 공간그리드의 구성 프로세스

연결 및 조합방식, 그리고 이로부터 구성되는 공간그리드 형상 등은 <표 8>에 나타내었다. 이때 다면체 유닛의 형태는 보편적으로 볼 수 있는 공간트러스의 외관과 유사한 형상으로 구성될 수 있는 유닛을 선택하여 기존의 공간그리드와 간접비교가 가능하도록 하였다.

<표 8>에서 세 유닛으로 구성된 밀집형 공간그리드의 특성을 살펴보면, 우선 그리드 경계면에서 차이를 발견할 수 있다. 텐서그러티 유닛의 경우는 상대적으로 부정형(不定形) 경계면을 나타내므로, 기둥이 아닌 벽체와 같은 지지구조의 선택에는 제한이 따를 것으로 여겨진다.

다음으로 유닛의 측면이 구성하는 공간은 응용분야와도 관계가 있는데, 하이브리드 유닛은 안정요소가 측면을 폐쇄형으로 만드는 다른 유닛들에 비해 개방성이 뛰어나기 때문에 높낮이를 조절하는 것만

<표 8> 밀집형 공간그리드

	다면체 유닛	텐서그러티 유닛	하이브리드 유닛
형태	삼각프리즘 	사각 T-프리즘 	산형AC
연결	F-F	V-C	E-E
평면			
입면			
그리드 형상			
상하부 레이어	평면형	평면형	평면형 / (절)곡면형
경계면 형상	정형(定形)	부정형(不定形)	정형
측면 공간	폐쇄형	폐쇄형	개방형

<표 9> 개구형 공간그리드

	다면체 유닛	텐서그러티 유닛	하이브리드 유닛
그리드 형상			
평면			

으로 측면의 공간 확보가 용이한 측면이 보인다. 반면, 다면체나 텐서그리티 유닛으로 형성된 공간그리드에서는 안정요소와 교차하는 압축재로 인해 측면 개구공간을 확보하기 어렵고, 따라서 통로형 공간이 필요한 용도의 구조물에 적용하기 위해서는 유닛의 형태 배열이나 회전 등을 고려할 필요가 있다.

상·하부 레이어에 있어서는 세 유닛 모두 동일 높이의 지점을 확보할 수 있고, 평면 구성이 가능하다. 그러나 하이브리드 유닛에서는 이를 위해 보강요소의 도입이 필요하기도 하고, 곡률을 가지는 AC 유닛은 한 면 레이어의 평면구성이 불가능한 공간그리드를 만든다. 언급한 사항들이 3차원 유닛으로 공간그리드를 구성할 때 구조물의 용도, 마감(재) 등의 관계와 함께 고려되어야 하는 형태적 특성들이 된다.

<표 9>는 <표 8>의 경우와 동일한 유닛형태와 연결, 조합방식을 이용하여 공간그리드에 개구부를 구성한 예를 보여주는 것으로, 이것은 공간분할에 따른 그리드와 달리 3차원 유닛으로 형성된 공간그리드에서는 유닛의 소거와 부가로 변화하는 전체 형상을 구성하는 것이 매우 용이한 특성을 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서는 공간그리드의 조형요소로서 구조적 합리성을 수반하는 3차원 유닛의 특성과 형태구성에 대해 고찰하였다.

본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 공간그리드는 구조적으로 효율적인 3차원 거동을 하고, 조형의 측면에서는 3차원 유닛의 조합에 의한 형태구성이 용이하다.
- 2) 3차원 유닛은 조합에 의해 공간그리드의 개념을 만족하는 동시에, 단위형태와 조형요소로 기능할 수 있다.
- 3) 다면체 유닛, 텐서그리티 유닛, 그리고 하이브리드 유닛은 개별 구조형식의 특성과 조건에 따라 기하학적 형태미를 드러내도록 형성될 수 있다.
- 4) 3차원 유닛의 규칙적인 개별 연결방식과 배열방식을 토대로 각 유닛을 연결하고 공간그리드의 형상을 조절할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. G. S. Ramaswamy, M. Eekhout & G. R. Suresh, "Steel Space Frame; Analysis, design and construction", Thomas Telford, 2002, pp.2~3
2. H. Engel, "Structure Systems", Gerd Hatje Publisher, 1997, pp. 39~43
3. B. Fuller, "Synergetics Vol. 1 & Vol. 2", Macmillan Pub Co, 1982 & A. Pugh, "An introduction to tensegrity", University of California Press, Berkely, 1976, pp.1~5
4. W. Schueller, "Horizontal-Span Building Structures", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1983, pp.333~336
5. 박찬수 & 최선영, "삼각형 케이블네트를 이용한 텐서그리티 구조 디자인", 대한건축학회 논문집(구조계) 22권 9호, pp.59-66
6. A. Pugh, "An introduction to tensegrity", University of California Press, Berkely, 1976, pp.15~18
7. H. Engel, "Structure Systems", Gerd Hatje Publisher, 1997, pp. 43
8. 齋藤公男, 空間構造物語, 彰國社, 2003, pp.218
9. 최선영, 박선우, 박찬수, 최취경, "건축구조 디자인 요소로서 다면체의 형태구성에 관한 연구", 한국공간구조학회 논문집 제6권 제2호, pp.107-114
10. A. Pugh, "Polyhedra; A visual approach", University of California Press, Berkely and L. A, 1976
11. A. L. Loeb, "Space Structures; Their harmony and counterpoint", Birkhäuser, Boston, 1991
12. P. R. Cromwell, "Polyhedra", Cambridge University Press, 1997
13. J. Chilton, "Space Grid Structures", Architectural

- Press, Oxford, 2000
14. R. Motro, "Tensegrity; Structural Systems for the Future", Kogan Page Science, Sterling, 2003
15. B. B. Wang, "Free-standing Tension Structures", Spon Press, London and New York, 2004
16. R. Motro, "Forms and forces in tensegrity systems", 3rd International Conference on Space Structures, pp.180-185