

## 연성구조시스템의 분류체계와 용어

### The Term and Classification of Structure System with Non-rigid Member

이 주 나\*                      박 선 우\*\*                      김 승 덕\*\*\*                      박 찬 수\*\*\*\*  
Lee, Ju-Na                      Park, Sun-Woo                      Kim, Seung-Deog                      Park, Chan-Soo

#### 요약

연성 구조시스템은 연성재를 주 구조부재로 하여 전체 구조체계가 하중의 변화에 따라 형태가 변화할 수 있는 구조시스템이다. 이 시스템들을 힘의 전달방식을 달리하는 구조의 구성방식에 따라 분류하고, 구성방식을 파악하기 용이한 연성구조시스템의 용어를 채택하였다. 따라서 연성구조시스템은 연성선재와 연성면재의 구성에 따라 분류되었는데, 연성선재구조물에 일방향 케이블구조, 격자형 케이블구조, 방사형 케이블구조, 연성면재의 구조물에 공기막구조 현수막구조, 선재와 면재의 하이브리드 구조물에 달림형하이브리드 막구조, 들림형 하이브리드 막구조로 분류체계와 용어를 결정하였다.

#### Abstract

The structure systems with non-rigid member were classified by the composition type of line and surface members. As a result of the classification, there are 1-way cable structure, cable net and radial cable net structure in the line member system. And there are pneumatic structure and suspension membrane structure in surface member system. In addition, when the line and surface members are composed together, there is the hybrid membrane system which are divided into hanging type and supported type. In this paper, the Korean terms of structure systems with non-rigid member are recommended through this classification.

**키워드:** 연성 구조시스템, 일방향 케이블구조, 격자형 케이블구조, 공기막구조, 현수막구조, 하이브리드 구조

**keywords:** Structure system with non-rigid member, 1-way cable structure, Cable net structure, Suspension membrane structure, pneumatic structure, hybrid structure

## 1. 서론

전체 구조형식을 체계적으로 구분하여 적절한 구조시스템의 용어를 사용하는 것은 건축물의 구조체계를 판단하고 구조구성을 이해하는데 있어서 반드시 필요한 일이다. 이제까지의 건축물의 구조는 주로 재료에 의해서 구분되고 불리어진 면이 있다고 할 수 있다. 그러나 건축과정에서 구조를 보다 실질적으로 다루기 위하여는, 단순히 재료에 의한

구분보다, 구조시스템을 이루는 힘의 전달방식과 부재의 역할을 파악할 수 있는 체계적 접근과 분류 및 용어인식이 필요하다. 이것은 특별히 다양한 구조의 구법을 건축계획에 반영하고자 하는 구조디자인의 측면에서는 필수적이라고 할 수 있다.

강성이 없는 케이블과 막같은 연성부재를 이용하는 구조의 경우는 그 구법이 일반적이지 못하고 관점에 따라 구조부재의 역할을 다르게 파악할 수 있어, 구조시스템의 용어부터 일관되지 못한 실정이다. 더욱이 국내에서는 이러한 연성구조물의 실제 적용의 예가 적고 이론적 체계가 확립되지 못한 관계로 구조형식의 원리인식이 부족하고 국내용어가 일관되지 못하고 있는 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 연성부재를 이용하여 구조를 구성하는 연성 구조시스템의 종류를 살펴 체계적으로 분류하고, 연성구조의 구성방식을 쉽게

\* 정회원, 배재대 건축학과 겸임교수, 공학박사

Tel : 043-261-2432, E-mail : juna24@hanmail.net

\*\* 정회원, 한국예술종합학교 미술원 건축과 교수, 공학박사

E-mail: psw@knu.ac.kr

\*\*\* 정회원, 세명대 건축과 교수, 공학박사

E-mail : sabinus@semyung.ac.kr

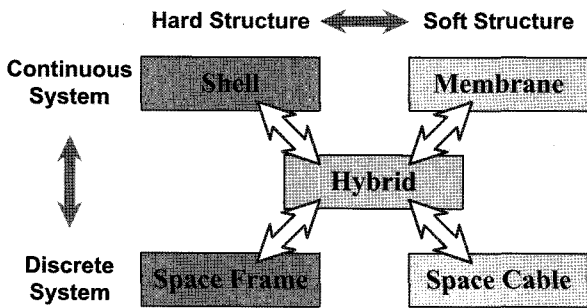
\*\*\*\* 정회원, 충북대 건축공학과 교수, 공학박사

E-mail: cspark@chungbuk.ac.kr

파악할 수 있는 용어를 결정하고자 한다. 이것은 연성구조의 힘의 전달방식을 인식하게 하여 다양한 연성구조 디자인을 원활히 할 것이다.

## 2. 연성 구조시스템의 정의

특히 대공간을 이루는 구조시스템을 고려해보면, 대공간 구조에서는 부재에 발생하는 응력을 최소화 하는 것이 무엇보다도 요구되기 때문에 위 그림1과 같이 응력효율이 뛰어난 구조시스템들이 주로 사용 된다고 볼 수 있다.



〈그림 1〉 연성구조시스템과 강성구조시스템

대표적으로 구조시스템에 사용되는 부재에는 강성재와 연성재가 있다고 할 수 있는 데, 이중 연성재는 압축강성이 없어 자중에 의해서도 좌굴되는 막이나 케이블과 같은 부재이다.

이들 연성재는 유일하게 인장응력을 발휘할 수 있어 구조응력이 높으면서도 단면이 적게 들고 구조를 가볍게 하여 구조효율이 높은 효과적인 대공간 구조재라고 할 수 있다. 또한 자유로운 형태를 구성할 수 있어서 창의적인 형태로 건축에 아름다움을 더하고 있다. 그러나 고정된 형태를 이루는 것이 아니라 하중에 따라 형태가 변화하여 안정성이 부족한 것이 구조구성에 있어 어려움을 주고 고도의 기술을 요구하여 시공성이나 경제성 면에서 해결해야 할 문제를 가져오는 구조재이기도 하다. 이와 같이 연성재는 여러 장단점을 가지고 있고, 연성재의 특성상 구조의 구법에 따라 전체 건축물의 형태와 공간구성이 좌우되는 특성을 가지기 때문에 건축물에서 연성 구조시스템이 보다 구체적으로 연구되어야 할 필요성을 가진다고 본다.

따라서 본 연구에서는 연성재를 주 구조부재로 하여 전체 구조시스템의 하중 전달체계가 하중의 변화에 따라 형태가 변화할 수 있는 구조시스템을 연성 구조시스템이라 정의하고자 한다.

## 3. 연성 구조시스템의 분류체계

우선 양측의 수직부재로 하중을 전달하는 수평 구조시스템 안에서 연성재를 이용하여 구조를 이루는 구조시스템을 분류하면 표1과 같다. 구조시스템은 연성부재의 구성을 체계적으로 파악하고 활용할 수 있도록 분류되었고, 각 구조시스템의 구성방식을 인식할 수 있는 용어로 구조시스템 명칭을 선정하여 나타내었다.

연성 구조시스템의 분류는 기본적으로 연성선재와 연성면재로 구분되는 구조부재의 구성에 따라 구분되어졌다. 부재구성방식을 기준으로 분류함으로써 연성 구조시스템의 구성을 이해하고 각 구조시스템에서 부재의 역할을 체계적으로 파악할 수 있게 한 것이다. 따라서 가장 기본적으로 연성선재와 연성면재, 그리고 이 연성선재와 연성면재가 복합적으로 사용되어 주 구조체를 이루는 방식이 있다고 보았다.

### 3.1 선재 연성구조시스템

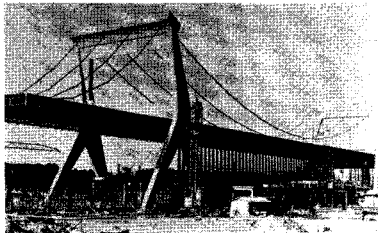
선재의 경우는 힘의 전달방향에 따라 다양한 구조시스템이 나타나게 되므로 힘의 전달방향에 따라 일축방향과 다축방향으로 세부 분류하였다. 따라서 일축방향에 일방향 케이블구조가 해당되며 다축방향의 구조시스템으로는 격자형과 방사형 케이블구조가 있으므로, 각 구조시스템의 세부구성방식과 용어의 의미를 살펴본다.

#### 3.1.1 일방향 케이블구조

일방향 케이블구조는 케이블과 같은 연성선재를 한 방향으로 걸어 양지점사이의 하중을 인장응력으로 전달하는 구조방식이다. 주 스패를 따라 케이블을 배치하면 등분포하중이 작용하고 부재는 현수곡선을 이룬다.(그림2. 참조)

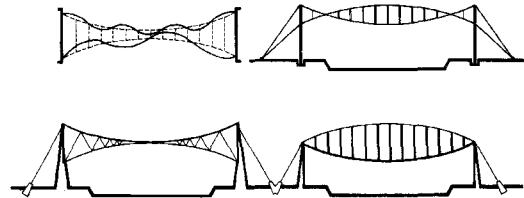
이 구조방식은 현수교 등이 그 전형적인 구조에

로, 현수구조(Suspension Structure)의 대표적인 방식이다. 현수구조라는 용어는 인장재를 사용하는 구조전체에 사용할 수 있는 매우 포괄적인 용어로서, 다양한 연성구조시스템중 하나로 이 구조의 구성방식을 용이하게 파악하기 위하여 일방향 케이블 구조라는 용어를 사용하였다.

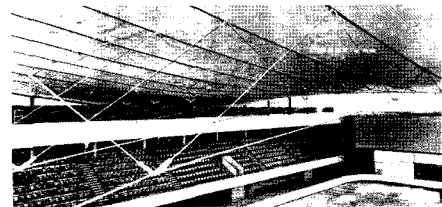


〈그림 2〉 부르고 종이공장

유연한 케이블에 안정성을 확보하기 위하여 상부에 중량마감재나 하부구조를 사용하는 단층형의 구성방식이 있고, 상향력에 저항하는 안정케이블을 덧붙여 복층의 구성을 이룰 수도 있다.(그림3 참조)



〈그림 3〉 복층방식 케이블구조의 여러 방식



〈그림 4〉 Billingham 아이스링크의 복층방식 케이블 보

〈표 1〉 연성 구조시스템의 분류체계

부재구성방식		구조시스템 명칭*	세부 구성방식의 예	
연성 선재	일축 방향	일방향 케이블구조	단층	
			복층	
	다축 방향	격자형 케이블구조	단층	
			복층	
		방사형 케이블구조	단층	
			복층	
연성 면재	공기지 지방식	공기막구조	단일막	
			이중막	
	장력지 지방식	현수막구조		
연성 선재 + 연성 면재 (하이브리드)	달림형	달림형 하이브리드 막구조		
	들림형	들림형 하이브리드 막구조		

\* 각 구조시스템의 용어는 「대공간 연성구조물의 설계 및 시공기법개발」 연구팀의 연구협업과정을 통하여 결정되었음.

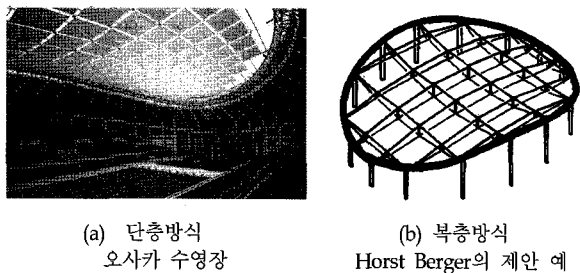
이러한 복층방식 케이블구조는 케이블 보, 케이블 트러스(Cable beam, Cable truss)라고 불리기도 하는 시스템으로 아래로 늘어지는 주 케이블의 위에 압축지주를 이용하여 위로 볼록한 안정케이블을 덧붙이기도 하고, 케이블을 직선이나 경사로 덧붙여 주케이블의 아래에 안정케이블을 첨가하기도 하는 등의 다양한 방식을 사용한다. 이 복층방식 케이블보는 상향력에 대한 안정성 확보외에도 보다 높은 강성과 강도를 가지게 된다.1)

### 3.1.2 격자형 케이블구조

유연한 케이블을 사용하여 인장응력을 다축방향으로 분산 전달하는 시스템중 케이블을 직교시켜 하중을 전달하는 시스템이다. 케이블 넷(Cable Net) 시스템으로 알려져 있다. 케이블을 이용하여 일방향 케이블구조와 유사한 힘의 구성을 가지면서도 힘의 전달방향이 달라지는 것을 인식할 수 있는 용어로서 격자형 케이블구조라는 용어를 사용하였다.

격자형 케이블구조에도 단층의 구성외에도 일방향 케이블구조의 케이블 보와 같은 복층구성을 가

저을 수 있다.(그림5 (b) 참조)

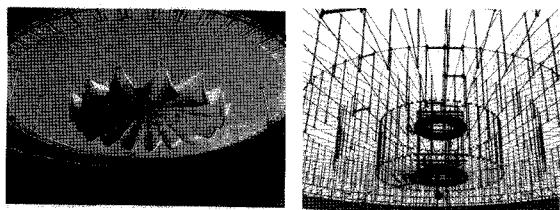


〈그림 5〉 격자형 케이블구조

### 3.1.3 방사형 케이블구조

연성체인 케이블을 방사방향으로 걸어 힘을 전달하는 구조시스템이다. 접시구조, 자전거바퀴형구조 등(Dish2), Bicycle wheel roof, Radial cable structure1))으로 불리기도 한다. 본 연구에서는 앞선 케이블구조들의 구조원리는 유사하나 방사형으로 배열된 선재의 구성을 고려하여 방사형 케이블구조라 하였다.

방사형 케이블구조 또한 케이블보로 구성된 선재를 방사형으로 배열하여 복층방식의 구조를 구성할 수 있다.



단층방식 Zaragoza Arena      복층방식 Utica civic auditorium

〈그림 6〉 방사형 케이블구조의 사례

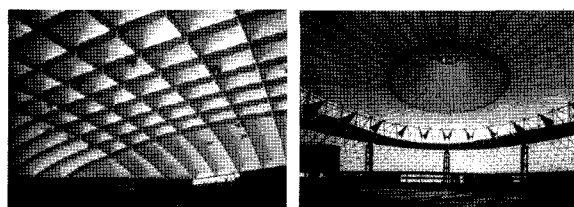
## 3.2 면재 연성구조시스템

면재의 장력을 이용하여 하중을 전이하는 시스템은 면재이기 때문에 힘의 전달에 방향성을 특별히 인식하여야 할 필요성이 없어진다. 대신에 막에 장력을 주는 방식이 크게 공기를 이용한 방식과 증력에 대항하여 당기는 방식으로 구분된다. 따라서 공기막구조와 지지점사이에서 당겨지는 막의 장력에 의하여 구조를 이루고 있는 현수막구조로 나누어 고찰한다.

### 3.2.1 공기막 구조

공기막구조의 경우는 공기로 막을 지지하여 막의 장력을 이끌어내고 이로써 공간을 이루는 구조방식이다. 공간구성을 이루는 구조의 특성을 구분하여 보았을 때, 공기막구조는 사용할 수 있게 되는 공간에 직접 공기를 주입하는 방식과 튜브와 같이 공기를 담고 있는 쿠션이나 아치, 기둥 등의 구조를 이뤄 공기를 주입하지 않는 공간을 만들어 내는 방식으로 크게 나누어진다. 감싸진 공간전체에 공기를 주입하는 방식은 단일층방식, 단일막방식, 공기지지방식, 단막방식 등 여러용어로 불리고 있는데, 단일막방식이라 하였다. 그리고 튜브와 같이 단혀진 막재안에 공기를 주입하여 지붕이나 뼈대를 이루는 방식은 이중막방식, 이중층방식, 공기주입방식 등으로 불리며 혹은 아치형의 공기막을 사용한 경우는 공기튜브방식으로 구분되어 인식되기도 하였으나 이중막방식이라 통일하였다.

공기막구조를 단일막방식과 이중막방식으로 구분하는 것은 이들 용어가 구조의 원리와 관계가 있는 막재 구성방식을 손쉽게 인식할 수 있게 하기 때문에 적합하다고 본다.



단일막방식의 실버돔      이중막방식의 구마모토 돔

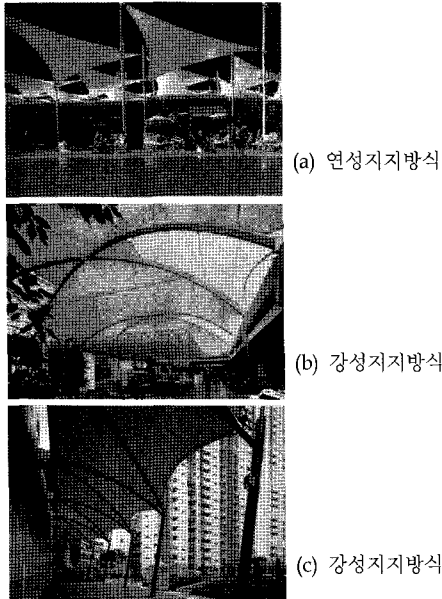
〈그림 7〉 공기막구조

### 3.2.2 현수막 구조

현수막구조는 연성체인 막에 장력을 도입하면서 하중에 저항할 수 있는 구조를 이루는 방식이다. 이 구조는 Prestressed membrane, Suspension membrane, 장력막구조 등으로 불리는데 이 구조의 구조원리 및 부재구성을 담고 있기 적절한 용어로 현수막구조를 선정하였다.

그림 8에서 보인 (a), (b), (c)현수막구조의 사례는 삼각형의 단위막재를 구조재로 사용한 경우이다. (a)의 경우는 삼각형막재의 가장자리 경계를 연

성재인 케이블로 구성된 연성지지방식으로 가장자리에서 현수곡선을 보인다. (b)의 경우는 가장자리 경계를 강성재인 철골아치를 사용한 강성지지방식으로 아치로 막재에 이중곡률을 유도한 예이다. 현수막구조는 이와 같이 정착방식에 따라 크게 다른 구성을 가지게 된다.



〈그림 8〉 현수막구조

특히 강성지지방식의 현수막구조 경우는 막재의 면적이 적어지게 되면, 전체 구조시스템에 미치는 연성적 특성이 줄어들고, 강성골조위에 마감재와 같은 역할을 하게 된다. 예를 들어 그림 8의 (b)와 같은 경우, 막을 정착하는 철골아치가 적은 스패스로 배열되어 전체 건물의 구조시스템의 역할을 하게 되면, 그림 8 (c)와 같이 막은 마감재의 역할을 하게 될 것이다. 그런 경우 전체 건물구조는 연성구조시스템의 성질과 달리, 철골아치가 강성구조물의 거동을 보이며 하중을 저항하므로 연성구조시스템의 범주에서 벗어나는 것이라고 하겠다. 그러나 마감재인 막부분은 현수막구조와 동일한 원리로 고려되어진다.

기존의 막구조의 인식에 있어서, 골조막구조라는 용어가 사용되어 강성골조위에 막을 마감재로 사용하는 구조와 현수막구조를 구별하기도 한다. 그러나 골조막구조는 현수막구조의 구조원리와 구성이

골조의 일부 마감에 사용된 예에 해당한다고 볼 수 있다. 흔히 골조막구조라고 불리는 구조는 마감재인 막재의 파손이나 제거로 인해 건물전체의 안정성이나 구성에 영향을 미치지 않는다. 그러므로 하나의 다른 연성 구조시스템으로 분리하고 구별할 수 없다.

또한 구조시스템에서 현수막구조와 골조막구조를 구분하는 것은 구조물에서 사용된 막을 마감재로 볼 것인지, 구조재로 볼 것인지를 막의 크기나 이미지에 따라 구별하는 등, 관찰자에 따라 구분이 혼동되고 마땅히 제시할 기준도 가지고 있지 못하다. 그것은 골조막이라는 용어가 마감으로 사용된 막의 재료적 특징만을 언급하는 것으로, 마감으로 사용된 막의 구조적 특성이 현수막구조와 다르지 않으며, 실은 구조전체의 힘의 전달방식은 연성구조체가 아닌 강성구조체이기 때문이다. 즉, 골조막구조라는 용어는 철골트러스구조나, 샌드위치판넬 구조 등과 같이 재료를 인식하는 구조용어이지 연성구조자체의 힘의 전달방식을 구분하고 인식하는 용어라 할 수 없다.

주 구조체와 바닥구조, 또는 지붕이나 마감구조 등이 복합적으로 이루어내는 건축구조에서 구조시스템으로 그 구성을 파악하고자 할 때, 마감재료의 구성방식을 전체 구조시스템으로 인식하여 구분하는 것은 일반적인 방식도 아니며 바람직하지 못하다고 생각한다.

막구조 설계에 있어서도, 관심을 기울이는 부분은 막의 지점과 정착방식을 달리함으로써 곡면이 이루는 형태변화를 얻어내는 방식과 원리에 관해서라고 할 수 있다. 장력막구조의 구조원리 및 체계는 현수막구조로 설명될 수 있으며, 현수막구조가 연성재로 지지되는 경우에는 보다 역동적이고 가벼운 막구조를 이루게 되며, 강성재로 지지되는 경우에는 안정적 성질을 가지게 되는 것으로 파악되어야 할 것이다.

### 3.3 하이브리드형 연성구조시스템

연성구조시스템 중 연성 면재와 선재를 복합 사용하여 구조를 구성하는 방식이 있다. 이 선재와

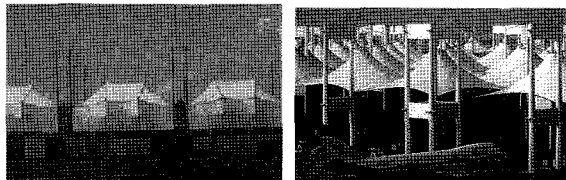
면재의 복합구성을 하이브리드라는 용어를 사용하여 하이브리드 막구조라고 하였다. 하이브리드라는 용어는 여러 복합성질을 고려하는 구조분야에서 사용하고 있다. 특히 구조시스템의 인식에 있어 하이브리드 구조는 케이블과 강재, 혹은 케이블과 막재 1), 혹은 휨재와 케이블 등이 복합적으로 사용된 구조3)에 사용하는 예들이 다수 있어서, 마치 케이블이 다른 재료에 복합적으로 사용되면 하이브리드라고 인식되어온 바 적지 않다. 이는 여러 구조시스템의 힘의 전달원리를 체계적으로 인식한 것이라 할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 당 연구범위인 연성구조시스템에서, 힘의 전달이 크게 달라지는 연성선재와 면재를 복합적으로 사용한 것을 구조시스템의 다른 분류로서 하이브리드라 하였다. 대표적으로 막과 케이블이 복합적으로 사용된 것을 의미한다.

현수막구조는 하부지지구조를 장력이 발생하는 막으로 덮는 구조임에 반해, 하이브리드형 막구조들은 막을 당기는 지점을 케이블을 이용해 다변화시키고 하부 가용공간에 영향을 주지 않는다는 특징이 있다. 이 구조에는 달림형 방식과 들림형 방식이 있다고 본다.

### 3.3.1 달림형 하이브리드 막구조

연성선재인 케이블로 연성막재인 막을 매달아 올려 지점사이에서 공간을 구성하는 구조시스템을 달림형 하이브리드 막구조라고 하였다.

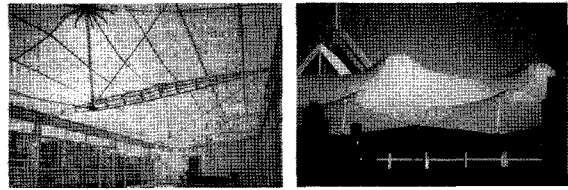


셸리버그연구소      사우디 Jeddah 공항

〈그림 9〉 달림형 하이브리드 막구조

### 3.3.2 들림형 하이브리드 막구조

달림형과는 반대로 하부에서 짧은 압축재를 받치고 케이블을 당겨서 막을 들어올리는 구조시스템은 들림형 하이브리드 막구조라고 하였다.



〈그림 10〉 들림형 하이브리드 막구조

이들 하이브리드 막구조의 경우는 연성재인 막의 지점이 연성재인 케이블로 지지되어 안정성유지에 보다 높은 기술력이 필요하다. 그러나 경량의 막과 케이블이 구조를 이룸에 따라 구조효율이 높고 형태구성효과가 뛰어나며 공간확보가 용이하기 때문에 연성구조에 있어 적극적인 활용이 기대되는 구조시스템으로 생각된다.

기술한 바와 같이 연성구조시스템을 분류하고 구조구성을 파악할 수 있는 용어를 제시하였다. 더불어 표 1에서는 이 구조시스템들의 각 연성구조시스템의 전형적인 형태를 나타내었다. 그러나 연성구조시스템은 정착방식이나 평면의 형태, 안정방식 등이 변화하거나, 다른 강성구조시스템과 결합하여 복합적으로 사용되어, 전형적인 형태에서 벗어나 보다 다양한 건축구조로 발전되고 사용되게 될 것이다.

## 4. 결 론

다양한 연성부재를 이용하는 구조시스템을 고찰한 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 연성 구조시스템은 연성재를 주 구조부재로 하여 전체 구조시스템이 하중의 변화에 따라 형태가 변화할 수 있는 구조시스템이라 정의하였다.
- 2) 연성부재 구성방식을 체계적으로 파악할 수 있게 하기 위하여 연성선재와 연성면재, 그리고 연성선재와 연성면재의 복합으로 이루어진 구조시스템으로 분류하고 세부구성에 따라 세분하였다.
- 3) 구조시스템은 분류된 바와 같이 구조 구성방식을 파악할 수 있는 명칭으로 불리어지는 것이 바람직하다고 본다. 따라서 논의된 바와 같이 일방향 케이블구조, 격자형 케이블구조, 방사형 케이블구조, 공기막구조, 현수막구조, 달림형 하이브리드 막

구조, 들림형 하이브리드 막구조라는 용어를 결정하였다.

구조시스템을 구성하는 구조원리와 부재구성을 파악할 수 있는 용어를 결정하고 통일하여 사용하는 것은 연성구조시스템의 이해를 돕고, 건축관계자들의 인식을 동일하게 하여 건축에 원활이 반영되게 할 것이다. 차후 보다 적극적인 연성구조의 활용을 위하여 구체적인 설계방법과 디자인방안을 제시할 수 있는 연구를 진행하고자 한다.

### 감사의 글

본 연구는 「2003년 건설기술기반 구축사업 지역특성화분야」 연구개발비에 의해 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. W. Schueller, "The Design of Building Structures", Prentice-Hall, 1995.
2. T. Y. Lin, S. D. Stotesbury, "Structural Concepts and Systems for Architects and Engineers", Vannostrand Reinhold, 1988.
3. H. Engel, "Structure Systems", Gerd Hatje Publishers, 1997.
4. A. J. Macdonald, "Structure & Architecture", Butterworth Architecture, 1994.
5. D. L. Schodek, "Structures", Prentice-Hall Inc, 1980.
6. F. Otto, "Tensile Structures", Prentice-Hall, 1980.
7. 이주나, "건축구조계획을 위한 인장시스템의 특성 및 유형분석", 충북대학교 박사학위논문, 2004.
8. 대한건축학회, "구조계획", 기문당, 1997.