

# 휨 구조시스템의 구조디자인적 구성요소와 디자인 조합 수법 분석

## A Study on Design Methods and the Composition Elements in Flexure Structure Systems

이 주 나\*

Lee, Juna

### Abstract

This study analyzes the four composition elements : profile, anchorage and connection, material and member rigidity, stability, as the main composition design elements of flexure structure systems, in order to explore possibilities for more various structure designs in architectures with flexure structure system. It also examines typical design methods that use the mentioned four composition elements. At the results, this research presents an understanding of the differences between funicular shape and non-funicular shape and mechanical features of the shapes in the profile element, regarding to the ratio of rise height to span length( $f/l$ ). Also, the typical design methods are presented for the designable usages of the hinge joints and the fix joints, and for the applications of member rigidity expressed by the index of the ratio of member depth to span length( $d/l$ ). And it was presented that connection styles, addition of brace members, placement of shear walls are the main design methods in the stability element. This data would be useful to architectural designs concerning integrated design with structures.

*Keywords : Flexure structure system, Design composition elements, Funicular shape, Flexure rigidity, Structure design*

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

건축공간을 구성하는 구조시스템에 있어서 휨 저항능력은 가장 빈번히 요구되는 구조부재의 능력이라고 할 수 있다. 흔히 '보와 기둥'이라고 하는 선형 휨부재의 조합을 생각했을 때, 수직하중을 반력지점으로 전달하는 구조시스템에서 보부재는 휨응력을 전적으로 활용한다. 형태가 변형되거나 접합의 양상이 변한다고해도 단일 단면의 휨강성부재를 사용하면 부재 내에 일정부분 휨능력이 항상 요구된다고 할 수 있다. 그리고 실상 현대 건축에서 가장 익숙하면서도 일반적으로 사용하고 있는 구조방식은 하중을 우회시켜 공간을 구성하게 하는 수평구조부에

선형의 휨부재를 사용하는 휨 구조시스템이라고 할 수 있을 것이다.

이렇듯 휨모멘트는 구조시스템에서 가장 빈번히 고려되어야 하는 부재력으로 이에 대한 저항방식을 결정하는 것이 구조의 디자인 전반에 매우 중대한 영향을 미친다. 전형적인 라멘구조의 경우는 이미 활용방법이 완벽하게 숙지되고 있는 것이 사실이나, 구조디자인의 시각에서 봤을 때 구조적인 의미를 초기에 파악할 수 있는 정보는 여전히 잘 마련되어 있지 못하다고 생각된다.

디자인에 영향을 미치는 구조체의 형태와 구성은 건축계획 초기에 결정되어야 하는 것이기 때문에 구조시스템의 디자인 가능요소와 그 변화가능성 내지 그 의미는 해석이전에 간단하게 인식되고 쉽게 파악될 수 있어야 한다. 그래야 구조디자이너가 쉽게 건축설계에 접목될 수 있고 구조로 인해 건축계획의 큰 틀이 방해받지 않을 것이다. 특히 구조가 지배적인 대공간에서는 이러한 부분이 건축계획 초기

\* 정회원, 서울시립대 건축학부 객원교수, 공학박사  
Department of Architectural Engineering, University of Seoul  
Tel: 02-6490-2765 Fax: 02-6490-2749  
E-mail: juna@uos.ac.kr

부터 민감하게 작용할 것이라고 생각된다.

따라서 본 논문에서는 가장 기본적인 구조시스템이라 할 수 있는 휨 구조시스템에서 디자인을 능동적으로 변화시킬 수 있는 디자인 구성요소를 드러내고, 이들 변화를 통해 얻을 수 있는 구조디자인 수법을 유형적으로 제시하고자 하며, 이때 초기 구조디자인 의사결정을 도울 수 있도록, 구성요소의 변화와 구조거동의 관계를 쉽게 파악할 수 있는 디자인 지표를 함께 제시하고자 한다.

### 1.2 연구의 범위 및 방법

휨응력은 하나의 부재단면 안에 인장응력과 압축응력이 중립축을 중심으로 동시에 발생하는 상태로, 하중이 지지점으로부터 거리를 가지고 작용될 때 일어난다. 특히 건축물의 구조시스템에서는 상부에서 작용하는 하중을 지지체로 옮겨 하부에 가용공간을 만들어내기 때문에 지지점과 하중점의 축이 일치하지 않는 일이 필연적이고, 보와 같은 수평구조부에는 휨모멘트에 대한 저항이 가장 지배적으로 고려된다. 본 연구에서는 이 휨응력을 주로 활용하여 하중을 전달하는 선형의 수평구조시스템(대표적으로 보)을 연구범위로 한정하여 이들의 구조디자인 방식과 그 활용정보를 체계적으로 살펴보고자 한다.

휨 구조시스템의 디자인에 영향을 미치는 구성요소로는 기존연구를 통하여 구조시스템의 디자인을 결정하는 구성요소로 파악된, 구조체의 입면형태 변화, 휨부재의 접합방식, 구조부재의 재료 및 단면강성, 골조의 안정성이 될 것으로 보고 이에 대하여 고찰하고자 한다<sup>1)</sup>. 이들 구성요소는 건축물 및 구조체의 조합과 형상을 결정하는 필수적인 요소일 뿐만 아니라 구성변화를 통하여 구조시스템의 역학적 변화를 가져오는 요소이기 때문이다.

각 구성요소가 휨 구조에 있어서 구조시스템의 구성상 어떠한 변화가능성을 가지고 있는지 살펴보고 구조디자인 수법의 활용유형을 탐색해보고자 한다. 또한 각 수법의 역학적 특성을 고찰하여 인지가 가능한 구조디자인 지표를 정리하여 나타내고자 한다.

## 2. 구조입면형태(profile) 변환

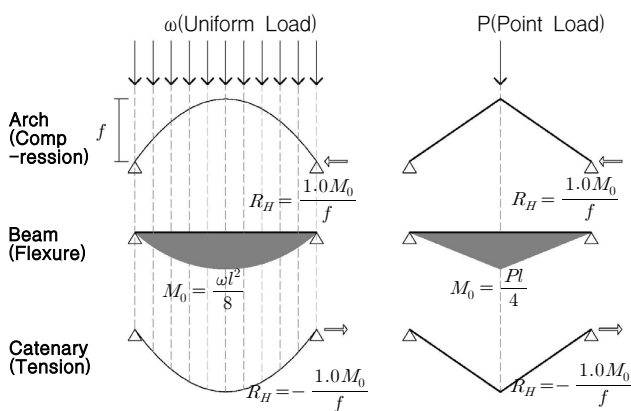
여기서 구조입면형태가 의미하는 것은 선형의 수평구조체가 길이방향으로 입면상 취하는 형태변화를 뜻하는 것이다. 가장 단순한 예로 직선형의 기다란 단순보는 길이방향으로 직선형태를 보이며 사용된다. 반원아치는 길이방향으로 원호의 형태를 보인다. 구축하는 건축물의 다양한 형태와 용도에 맞는 구조체에서 변화시켜가는 이러한 입면형을 여기서는 구조입면형태라고 하였다.

건축디자인에 있어서는 유형화할 수 없는 다양한 입면형태나 지붕형태가 존재하겠지만, 구조적인 의미에서 입면형의 변화는 연력도형과 직선형, 그리고 그사이의 변형형이라고 할 수 있다<Fig. 1 참조>. 이들 변화로 인한 구조디자인적 특성을 알아보고자 한다.

### 2.1 연력도형의 거동 - $f/l$ 의 변화

#### 2.1.1 집중하중과 포물하중에 대한 연력도형 거동

직선형이 아닌 구조에 가해지는 등분포하중은 두 가지의 종류가 있다. 하나는 입면형의 높낮이에 관계없이 스패에 걸쳐 동일한 간격으로 가해지는 하중으로 이 하중에 대한 연력도형은 포물곡선이다 <Fig. 1, 왼편>. 또 하나는 부재를 따라 동일한간격으로 가해지는 하중이 있다. 이 하중에 대한 연력도형은 현수곡선이다.



<Fig. 1> Changes of moment and reaction with changes of profile shapes

전자의 하중이 작용하는 경우에는 자중을 무시했을 때, 구조부재의 높낮이에 관계없이 지지점에 작용하는 반력이 동일하며, 사용하중이 작용하는 면은 구조부재면이 아니라 별도의 수평면이 된다. 후자의 하중은 구조부재의 높낮이에 따라 수직반력이 달라지게 되어 구조거동에 차이를 보인다. 많은 경우의 지붕면이 여기에 해당한다. 본 논문에서는 편의상이 하중의 명칭을 전자는 포물하중, 후자는 현수하중으로 구분하여 칭하고자 한다.

구조입면형의 변화는 이미지상의 변화로만 끝나는 것이 아니라 부재응력의 변화에 지배적인 영향을 미친다. <Fig. 1>의 중앙에서 보인 것처럼, 직선형의 단순보에서는 하중패턴에 따라 중앙부에 최대 휨모멘트가 발생하고 축력은 발생하지 않는다. 따라서 지점에 수평반력이 요구되지 않는다. 그러나 하중패턴에 맞춰 연력도형(아치나 현수)을 취하는 경우에는, 이론적으로 100%압축, 100%인장 축력부재로 거동하여 휨모멘트가 발생하지 않으며, 설정한 높이( $f$ : 아치에서는 라이즈(rise), 현수에서는 새그(sag))에 반비례하는 수평반력이 요구된다.

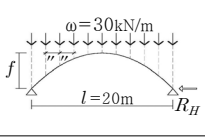

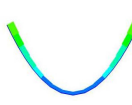
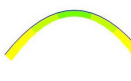



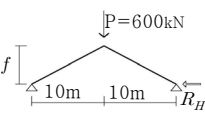






휨모멘트보다는 인장이나 압축축력이 훨씬 효율적인 힘이기 때문에, 연력도형과 유사하게 변화시키

는 구조입면형태의 변화는 작은 구조부재로 큰 능력을 가지게 할 수 있는 중요한 변수가 된다.

보다 구체적으로  $f$ 의 변화에 따른 연력도형의 축력과 수평반력의 변화효과를 알아보기 위하여, 본 연구에서는 20m 스패의 선형구조를 설정하고  $f$ 값을 10m, 6m, 3m로 변화시켜 포물 등분포하중과 집중하중을 적용하여 해석한 후 그 결과값을 <Table 1>에서 비교하여 나타내었다. 해석모델의 해석조건은 <Table 1>의 왼쪽 열에 나타내 보였다.

구조입면의  $f$ 값이 변화하여도 수직 반력의 총합이 동일하도록 포물 등분포하중을 가해지는 경우, 즉, <Table 1>의 그림에서 (")로 표기한 거리만큼 연직방향으로 동일한 거리를 가지도록 하중이 재하되는 경우의 연력도형은 알려진 바와 같이 포물곡선형이다. 따라서 <Table 1>의 중앙부(압축 연력도형)에는  $f$ 값(여기서는 rise)을 변화시킨 포물곡선 아치의 부재력을 표기하였다. 어떤 라이즈 값을 가지던 모멘트는 없고, <Table 1> 왼편에 나타난 직선형 모델의 최대모멘트  $1 \cdot (M_0)/f$ 값의 수평반력이 요구되는 것을 확인할 수 있다. 이 수평반력과 부재의 지배내력인 압축력은 라이즈가 감소할수록 커지는 것을 볼 수 있다. 동일한 수직반

<Table 1> Structural behavior of funicular shape structures with changes of  $f$  (Parabola Load)

Linear Shape	Funicular Shape		Compression Funicular Shape				Tension Funicular Shape							
	Load pattern	$f$ (m)	$f/l$	Axial Force Diagram	M max. (kN·m)	Axial F. max. (kN)	Support Reaction(kN)		Axial Force Diagram	M max. (kN·m)	Axial F. max. (kN)	Support Reaction(kN)		
							Ver. (Rv)	Hor. (R <sub>H</sub> ) = $M_0/f$				Ver. (Rv)	Hor. (R <sub>H</sub> ) = $M_0/f$	
 $\omega = 30 \text{ kN/m}$ $l = 20 \text{ m}$ V.Reaction(R <sub>v</sub> ) 300 kN H.Reaction(R <sub>H</sub> ) 0 kN Max.M(M <sub>0</sub> ) 1500kNm	Uniform Load (Parabola Arch)	10	1/2		0.0	-318.7	300	-150	$1.0(M_0/f) = 1500/10$		0.0	318.7	150	$1.0(M_0/f) = 1500/10$
		6	1/3.3		0.0	-376.3	300	-250	$1.0(M_0/f) = 1500/6$		0.0	376.3	250	$1.0(M_0/f) = 1500/6$
		3	1/6.7		0.0	-573.7	300	-500	$1.0(M_0/f) = 1500/3$		0.0	573.7	500	$1.0(M_0/f) = 1500/3$
 $P = 600 \text{ kN}$ $l = 20 \text{ m}$ V.Reaction(R <sub>v</sub> ) 300 kN H.Reaction(R <sub>H</sub> ) 0 kN Max.M(M <sub>0</sub> ) 3000kNm	Point Load (Gabled shape)	10	1/2		0.0	-424.3	300	-300	$1.0(M_0/f) = 3000/10$		0.0	424.3	300	$1.0(M_0/f) = 3000/10$
		6	1/3.3		0.0	-583.1	300	-500	$1.0(M_0/f) = 3000/6$		0.0	583.1	500	$1.0(M_0/f) = 3000/6$
		3	1/6.7		0.0	-1044	300	-100	$1.0(M_0/f) = 3000/3$		0.0	1044	100	$1.0(M_0/f) = 3000/3$

력을 가지면서도 하중패턴을 집중하중으로 변화시킨 경우, 등분포하중에 비해 부재축력도 증가하고 수평반력도 증가하나, 앞서 설명한 라이즈 증가에 따라 부재력이 감소하는 증상은 동일한 것을 알 수 있다. 그리고 이들 형태를 역전시킨 모델을 해석했을 때, <Table 1>의 오른쪽(인장연력도형)에 나타난 것처럼, 압축 연력도형과 부호가 완벽하게 반대인 값을 보여 인장과 압축의 역전효과를 확인할 수 있다.

따라서,  $f$ 의 변화로 인해 늘어나는 자중증가를 무시하는 경우, 연력도형을 취하면 전적으로 인장이나 압축으로 저항하게 되고, 라이즈(rise)나 새그(sag)의 증가는 부재축력을 감소시키고 지지점의 수평반력을 감소시키는 효과가 있어 구조효율이 극단적으로 높아지게 된다. 장스팬의 현수교나 아치교가 이 효과를 가장 명확하게 활용하는 실례가 될 것이다<Fig 2 참조>.

2.1.2 현수하중에 대한 연력도형 거동

앞서 나타난 이들 연력도형 효과는 구조입면형 변화의 효과를 원론적인 측면에서 설명하고자, 연력도형의 구조부재의 자중도 고려하지 않고 수평레벨선상의 포물하중만을 고려한 것이다. 당연히 실제 건축구조의 경우는 자중도 존재하며, 연력도형을 따라 지붕이 형성되어 하중재하면이 연력도를 따라 형성되는 경우가 대부분이다. 이때 하중은 연력도형을 따라 등간격으로 분포되는 것이 기본이라 할 수 있으며, 자중을 포함한 이러한 현수하중 재하 상태의 연력도형은 현수곡선(Catenary)을 취한다.

<Table 2>는 이러한 현수곡선의 연력도형 구

조에  $f$ 를 변화시키며 구조거동을 관찰한 결과이다. 해석의 조건은 <Table 2>의 왼쪽 그림에서 나타난 바와 같다. 인장연력도형의 경우는 압축과 역전된 동일한 효과를 가지므로 압축 연력도형 구조만을 활용하여 나타내었다.



Salginatobel Arch Bridge

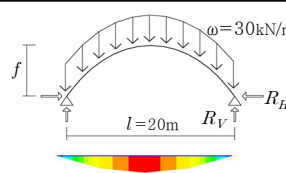
Brooklyn Bridge

<Fig. 2> Examples using parabola funicular shape

현수곡선의 연력도형에서도 모멘트는 거의 발생하지 않고 압축 축력으로만 하중을 전달하며, 라이즈가 높아질수록 수평반력이 감소하는 효과는 동일하게 나타난다. 그러나 라이즈가 증가하면 자중이 증가함과 동시에 하중재하면적이 늘어나기 때문에,  $f/l$ 비가 1/2.5보다 커지면 부재축력이 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. 발생한 부재내력을 만족하는 부재를 철골 H형강으로 설계했을 때도,  $f/l$ 비가 1/2인 경우에 오히려 더 큰 부재가 요구되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 역학적으로 효율성이 있는 입면형의 범위는 대략  $f/l$ 비, 1/2.5미만이라고 할 수 있다.

직선형의 경우는 하중면이 가장 적기는 하지만, 전적으로 휨모멘트로 저항하게 되고 이 모멘트를 만족시키는 부재를 설계했을 때 현수곡선형 아치의 최대부재보다 약 7배의 단면적을 요구된다. 따라서 대공간 지붕구조에서는 연력

<Table 2> Structural behavior of funicular shape structures with changes of  $f$  (Catenary Load)

Model condition & Analysis Result of Beam	Load pattern	$f$ (m)	$f/l$	Axial Force Diagram	M max. (kN·m)	Axial F. max. (kN)	Support Reaction(kN)		Designed Member	Section Area (㎡)	Depth (d/l)	
							Ver. (Rv)	Hor. (R <sub>H</sub> ) = M <sub>0</sub> /f				
 <p><math>f=0, f/l=0</math>                      V.Reaction(R<sub>v</sub>) 300 kN                      H.Reaction(R<sub>H</sub>) 0 kN                      Max.M(M<sub>0</sub>) 1500 kNm                      Designed Member : H-912×302×18/22                      Section Area : 0.0364 ㎡</p>	Catenary Arch	10	1/2		0.0	-459.6	446.9	-189.0	-	H-175×175×7.5/11	0.0051	1/114
		8	1/2.5		0.0	-436.9	402.8	-219.5	-	H-300×150×6.5/9	0.0047	1/67
		6	1/3.3		0.0	-435.6	354.8	-272.7	-	H-300×150×6.5/9	0.0047	
		3	1/6.7		0.0	-582.8	316.8	-501.7	-	H-350×175×7/11	0.0063	1/57

도형이 선호되고 있는데, 현실적으로는 연력도 곡선을 지붕면으로 활용하고자했을 때 증가되는 마감면과 상부공간체적 증가로 인해 라이즈의 효과를 목표하기에는 어려운 점이 있다. 이것이 30m미만의 중소규모 대공간에서는 형태디자인에 의도를 둔 다양한 라이즈가 존재하기도 하지만, 대규모의 대공간 지붕구조에서는  $f/l$ 비가 대체로 1/20~1/5범위의 낮은 라이즈 아치형인 것을 설명하고 있다<sup>2,3)</sup>.

## 2.2 비연력도형의 거동 - 수평반력계수와 연력도형 중첩효과

### 2.2.1 포물하중에 대한 비연력도형 거동

실제 건축물의 수평구조부는 연력도형을 그대로 따르지 않는 경우가 많을 것이다. 여기서는 구조입면형이 비연력도일 때의 전반적 구조거동 특성을 알아보려고 한다. 이를 위해 <Table 3>에서는 비연력도형 중에 포물하중을 받는 원호형과 산형의 부재거동을 해석해 보았다.

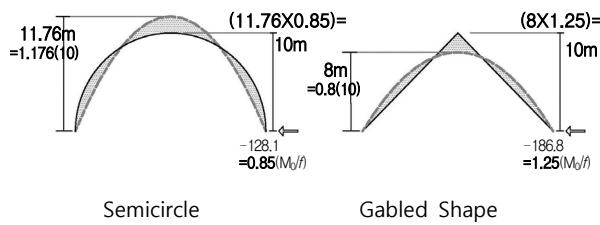
해석결과가 보이는 것처럼 연력도형을 벗어난 입면형의 경우에는 필수적으로 휨모멘트가 발생하게 된다. 그런데, 이 모멘트의 발생 패턴을 파악하는데 앞서 살펴본<Table 1, 2의 내용> 연력도형의 구조거동 특성이 활용된다. 연력도형의 성질은 구조형태가 구조거동에 영향을 미치는 가장 기본적인 특성이므로 이를 기본으로 하면 비연력도형의 구조거동의 전반적 예측이 가능한 것이다. <Table 3>의 오른쪽 열에 연력도형과 해당 구조입면형을 중첩하여 표현한 그림에서 볼 수 있는 것처럼, 비연력도형의 구조는 연력도형과 차이를 보이는 부분의 그 크기만큼 역전하여 모멘트가 작용한다. 일례로 논문의 도식상으로는 구분이 어려울만큼 연력도형(포물곡선)과 유사한 곡선을 보이는 라이즈 3m 원호의 예는 매우 적은 휨모멘트가 발생하는 것을 알 수 있고, 반면, 3힌지의 경우는 중앙부에 큰 모멘트가 나타나는 것을 중첩도를 통해 알 수 있다.

휨모멘트의 발생 및 증가와 더불어 여기서 주목되는 것은 수평추력과 축력의 변화이다. 휨모멘트의 추이와 별개로 연력도형에서 나타났던 라이즈변화로 인한 특성은 동일하게 나타난다. 즉, 라이즈가 높아질수록 산형과 아치형 모두 부재축력이 감소하고 수평추력 또한 감소한다.

<Table 3> Structural behavior of non-funicular shape(Arc, Gabled) / (Parabola Load)

	$f$	Moment Diagram max.Moment (kNm)	Axial F.max. (kN)	Support Reaction(kN)		Comparison with parabola line having same $R_H$ (→)	
				Ver. (Rv)	Hor.( $R_H$ ) = $M_0/f$		
Arc	10 semi circle		304.4	300	-128.1	$0.85(M_0/f)$ = $0.85(150)$	
	6		364.9		-235.9	$0.94(M_0/f)$ = $0.94(250)$	
	3		560.7		-485.2	$0.97(M_0/f)$ = $0.97(500)$	
Arc hinge	10 semi circle		309.8	300	-150.0	$1.0(M_0/f)$ = $1.0(150)$	
	6		372.8		-250.0	$1.0(M_0/f)$ = $1.0(250)$	
	3		576.0		-500.0	$1.0(M_0/f)$ = $1.0(500)$	
Gab- led shape	10 45°		331.0	300	-186.8	$1.25(M_0/f)$ = $1.25(150)$	
	6		411.4		-311.1	$1.24(M_0/f)$ = $1.24(250)$	
	3		674.9		-620.3	$1.24(M_0/f)$ = $1.24(500)$	
Gab- led hinge	10 45°		304.9	300	-150.0	$1.0(M_0/f)$ = $1.0(150)$	
	6		359.1		-250.0	$1.0(M_0/f)$ = $1.0(250)$	
	3		559.7		-500.0	$1.0(M_0/f)$ = $1.0(500)$	

특히, 발생하는 수평추력을 기본 연력도형에서 라이즈( $f$ )를 이용해  $1 \cdot (M_0)/f$ 값으로 산정할 수 있었는데, 이 값의 변화를 관찰할 필요가 있다. 예를 들어 반원의 경우는 연력도형을 벗어 나면서  $0.85 \cdot (M_0)/f$ 값의 수평추력이 발생하는데, 수평추력이 15%감소했다는 것은 라이즈가 1.176 배 증가하였을 때 나타나는 현상이므로, 라이즈를 증가시켜 동일한 수평추력을 가지는 연력도(점선)를 그린 후(<Fig. 3> 왼쪽, 여기서는 라이즈 11.76m, 점선으로 표기된 도형) 반원형의 구조입면형(실선, 여기서는 라이즈 10m)과 중첩시키면, 반원형에서 나타나는 모멘트 다이어그램과 동일한 다이어그램이 나타나는 것을 알 수 있다(해석결과와는 역전하여 표기하였음).



〈Fig. 3〉 Overlapping analysis of non-funicular and funicular shape

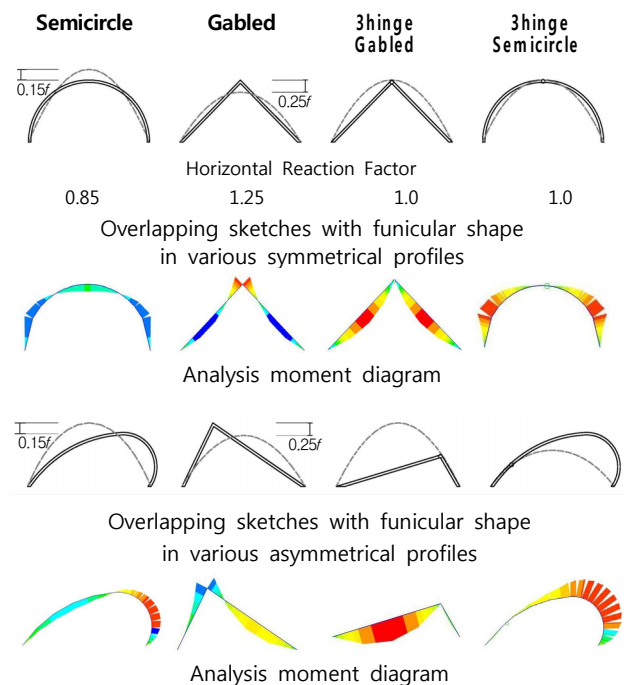
이와 동일한 방법으로 분석하였을 때, 산형의 경우에는 수평반력이 1.25배 증가하므로 보다 라이즈가 낮은 연력도형을 중첩하여 그리고 분석하였을 때 발생할 모멘트분배를 예측할 수 있다(Fig. 3의 오른쪽). 원호 아치의 경우에는 라이즈가 낮아질수록 연력도 포물곡선에 가까워지는 만큼 수평반력이  $0.94 \cdot (M_0)/f$ ,  $0.97 \cdot (M_0)/f$ 과 같이 연력도형의  $1.0 \cdot (M_0)/f$ 에 가까워지는 것이 관찰된다. 산형의 경우는 라이즈에 따라서 크게 변화하지 않으며, 중앙부에 힌지를 가진 3힌지 구조시스템의 경우는 원호와 산형 모두  $1.0 \cdot (M_0)/f$ 로 예측이 가능하다.

따라서 대별되는 원호, 산형, 3힌지 방식으로 크게 나누어서, 원래의 연력도형보다 변화된 라이즈 상태를 짐작할 수 있는 계수(반원호:0.85, 산형:1.25, 3힌지:1.0)를 파악하고 있는 것이 유용할 것이다. 이를 수평반력계수라고 본 논문에서는 지칭하고 비연력도형에서 쉽게 모멘트의 패턴을 파악할 수 있는 지표로 활용하고자 한다. 이러한 연력도형의 중첩원리를 파악하면 다양한 형태의 구조입면형에서 휨모멘트의 분배와 축력의 크기정도, 수평반력의 정도를 비교 파악할 수 있을 것으로 본다.

### 2.2.2 현수하중에 대한 비연력도형 거동

비연력도형 역시 현수하중에 대한 효과는 포물하중을 재하한 비연력도형과 동일하다(Table 4). 실제 건축물에서 지붕구조로 활용되는 방식과 가장 가까운 설정이라고 할 수 있는데, 연력도에 가까워지면 휨모멘트가 감소하면서 부재내부에 압축응력 비율이 늘고 압축구조 거동의 특징인 바깥쪽으로 뺀어지는 추력이 발생한다. 이것은 본 연구에서는 보이지 않았지만, 반대인 인장 연력도형을 따르는 경우도 마찬가지이다.

축력만 작용하는 연력도형의 분석에서도 나타났던 것처럼,  $f/l$ 비가 1/2로 커지는 경우 하중재하면적이 늘어나기 때문에 라이즈효과로 수평반력은 감소하지만, 수직반력도 최대가 되고, 부재 축력과 모멘트가 최대가 되는 것을 알 수 있다. 따라서 부재설계를 진행했을 때도 동일한 형태의 비교군 중에서 가장 큰 부재로 설계되는 것을 알 수 있다. 따라서 라이즈의 효과로 휨모멘트 감소와 부재절감의 효과를 얻을 수 있는 것은  $f/l$ 비가 1/2.5내외가 바람직할 것으로 생각된다.



〈Fig. 4〉 Moment patterns of non-funicular shapes realized by overlapping sketch with funicular shape

하중크기의 변화가 있어 동일한 스패니어도  $M_0$ 가 일정하지 않아 포물하중의 경우처럼 일관된 수평반력계수를 적용하기에는 어려움이 있다. 그러나 현수곡선 연력도에서 얻어진 수평반력을 이용해 수평반력계수를 계산해 보았을 때 포물하중의 경우와 유사한 값의 분포를 보이므로 포물하중에서 파악된 수평반력계수를 활용하여 휨모멘트 패턴을 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

이와 같은 원리를 활용하여, 〈Fig. 4〉에서는 여러 조형적 의도를 가진 비연력도형의 예를 가정하고, 이 수평반력계수(반원호:0.85, 산형:1.25, 3힌지:1.0)를 적용한 연력도형 중첩 스케치를 시도하였다. 그

<Table 4> Structural behavior of non-funicular shape(Arc, Gabled) / (Catenary Load)

	f (m)	f/l	Moment Diagram	Axial Force Diagram	Comparison with Catenary line having same R <sub>H</sub> (→)	M max. (kNm)	Axial F.max. (kN)	Support Reaction(kN)		Designed Member	Section Area (m <sup>2</sup> )	Depth (d/l)	
								Ver. (R <sub>V</sub> )	Hor.(R <sub>H</sub> ) = M <sub>0</sub> /f				
Arc	10	1/2				188.9 (-261.2)	-493.3	469.3	-155.8	0.82R <sub>H0</sub> =0.82(189)	H-482×300×11/15	0.0146	1/40
	6	1/3.3				60.6 (-76.0)	-451.7	367.2	-263.5	0.96R <sub>H0</sub> =0.96(273)	H-396×199×7/11	0.0072	1/50
	3	1/6.7				15.2 (-6.9)	-600.2	317.6	-500.1	0.99R <sub>H0</sub> =0.99(501)	H-350×175×7/11	0.0063	1/57
Gabled shape	10	1/2				-517.3 (271.7)	-486.6	424.3	-263.9	1.39R <sub>H0</sub> =1.39(189)	H-800×300×14/26	0.0267	1/25
	6	1/3.3				-417.4 (225.9)	-490.4	349.9	-362.0	1.33R <sub>H0</sub> =1.33(273)	H-594×302×14/23	0.0222	1/30
	3	1/6.7				-368.9 (207.1)	-707.8	313.2	-645.0	1.29R <sub>H0</sub> =1.29(501)	H-406×403×16/24	0.0255	1/45

리고 그 하부에는 실제 해석결과 나타나는 모멘트 다이어그램과 일치하는 것을 보였다. 이 수평반력계수를 활용하여 연력도를 중첩시키면 다양하게 디자인한 비연력도형의 구조입면형태에서 손쉽게 휨부재의 모멘트 패턴을 파악하는 것이 가능할 것이다.

### 2.3 사례에서 구조입면형태 변화 관찰

상기 기술한 구조입면형태의 특성을 실제 건축 사례를 통해 설명하기 위하여 몇 개의 구조디자인 사례를 <Table 5>에 모집하였다.

어떠한 사례에서든 구조입면형태의 특성은 관찰이 되는데, 연력도형을 기본으로 하여 형태를 비교해보면 그 모멘트의 분배정도를 쉽게 파악할 수 있을 것이다. <Table 5>에서는 비교적 큰 스패의 사례들을 나타내었는데, 직선형 외에 압축연력도형과 인장연력도형이 다양한 f/l비로 활용되고 있음을 보이 고자 하였으며, f/l비가 1/5보다 큰 예는 이미 알려진 바와 같이 구조체의 형태디자인 효과에 치중한 사례들이라는 것 또한 파악할 수 있게 하였다.

## 3. 정착 / 접합방식

### 3.1 정착 / 접합방식의 구조디자인적 특성

구조시스템은 각 부재를 지지점으로 연결시키거나 부재간을 연결하여 완성된다. 따라서 지지점으로 연결되는 '정착', 부재간을 연결하는 '접합'이 구조시스템의 형성을 결정하는 필수불가결한 요소이며,

이들이 구조디자인에도 크게 영향을 미치는 것은 쉽게 짐작할 수 있다.

여기서 표현하는 정착이라는 의미는 구조시스템 상에서 전달되는 힘을 해소하는 지지점의 설정방식을 의미하는 것이므로, 구조시스템의 반력체계의 설정방식을 고려해야한다는 의미이다.

<Table 5> Examples designed with various structural profile

Name	Image	Profile	Material	Span (m)	f/l	d/l
Oodate Jukai dome		Arc	Timber	178	1/3.78	1/148
Lyons Airport Station		Arc	R.C	120	1/4.5	1/55
City of Science (Planetarium)		Arc	R.C	110	1/4.7	1/130
Nagano Olympic Memorial Hall		Catenary	Steel Rod+ Timber	80	-1/16	1/267
Osanbashi Yokohama		Linear combine	Steel	35	1/14	1/15
Seoul Uni. Gymnasium		Arc combine	Steel	35	1/2	1/19
Chugokumo kuzai Nagoya Br.		Catenary	Steel Rod+ Timber	12	-1/8	1/80

역학적으로 의미를 가진 가장 기본적인 지지방식, 롤러, 힌지, 고정접합을 통해 구조시스템에 따라 수직반력, 수평반력, 휨모멘트의 반력생성을 조정할 필요가 있고, 경우에 따라서는 이들 지지방식의 조정이 디자인에 영향을 미친다. 예를 들어, 앞서 살펴본 바와 같이 구조재의 입면형을 변화시키면 직선형 부재와는 달리 부재의 형태에 따라 추력이 발생하므로 추력에 대한 정착방식을 고려하는 것이 반드시 요구되며, 이것이 구조디자인에 큰 영향을 미치게 되는 것을 의미한다.

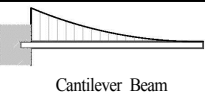

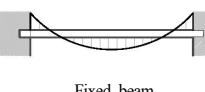





또한 부재간의 접합의 경우에도 롤러, 힌지, 고정으로 크게 구별되는 접합방식의 조합에 따라 부재강성이나 구조시스템 구성을 변화시키는 디자인으로 전개된다. 건축에서는 특수한 조건의 접합이라고 할 수 있는 롤러를 제외하면, 실상 접합은 회전을 허용하는 힌지접합과 허용하지 않는 고정접합으로 구분하여 볼 수 있는데, 이들 접합이 선형의 부재를 넘어 골조에 적용되면 접합방식의 종류와 접합위치에 따라 구조디자인 전반에 영향을 미치는 주요 디자인 요소로 활용된다.

### 3.2 정착 / 접합방식 변화에 따른 구조디자인 유형

힘을 수반하는 건축의 선형구조시스템에서 가능성 있는 접합의 종류를 휨모멘트를 전달할 수 있는 고정접합과 그렇지 않은 힌지접합으로 이분하고, 이에 따른 접합, 내지는 지지점을 1점에서부터 복수의 지지점으로 확대하였을 때 구성될 수 있는 접합방식의 구성패턴을 <Table 6>에서 탐색해보았다. 고정접합과 힌지의 적용에 따라 그리고 접합의 위치 및 개수에 따라 일반적으로 활용되고 있는 선형구조시스템의 디자인 유형을 보일 수 있다.

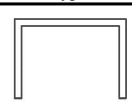
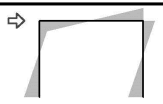

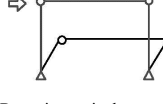
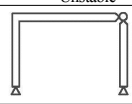
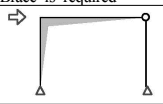
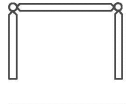


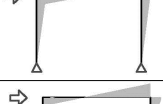
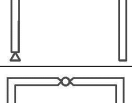
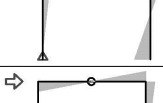
이와 더불어, 선형의 단일 수평부재에서 더 나아가 수평부재와 수직부재가 연결되는 골조 접합방식의 패턴을 탐색해볼 수 있겠는데, 여기서는 기본 라멘에 관하여 이 변화패턴의 예를 <Table 7>에서 보였고 이러한 접합의 구성패턴에 따라 수평하중에 관한 휨모멘트의 거동의 변화를 함께 보였다<sup>4)</sup>. 단일 라멘은 기본 4개의 접합부가 있고, 보의 중앙부에 추가접합을 의도할 수 있다. 이 접합가능 점에 힌지 가능성을 조합해보면 디자인 유형이 도출된다.

<Table 6> Types of connection in linear member

		Fix Connection	Hinge Connection
Number of Joint	1 point	 Cantilever Beam	 × unstable
	2 point	 Fixed beam	 Simple beam  Simple beam with cantilevers
	3 point		 × unstable
	4 point	-	 Gerber Beam

추력에 대한 정착이 구조물의 디자인에 직접적인 영향을 미치는 현수구조나 아치구조 등과 달리 휨 구조에서는 정착이나 접합이 직접적으로 외관에 영향을 미치지 않는다. 그러나 접합방식의 변화는 휨모멘트의 분배를 변화시키기 때문에 부재효율이나 시공방법에 영향을 미치는 것은 물론, 이후 디자인 요소가 되는 강성변화나 안정방식 등의 변화로 이어진다.

<Table 7> Types of connection in rahmen structure systems

No. of Joints	Fix	Hinge	Connection Type	Moment under Lateral Load
4 point	4 point	-		
	-	4 point		 × Unstable → Brace is required
	1 point	3 point		
	2 point	2 point		
	3 point	1 point		
5 point	2 point	3 point		



## 4. 재료 및 부재강성

구조재료는 모든 디자인에 있어 그러하듯이 보여지는 디자인을 좌우하는 가장 기본적인 원료이자, 구조체의 구조능력을 결정하는 중요한 요소이다.

먼저 디자인에 활용되는 가장 기본적인 재료특성으로는 역학적인 성질과 관계없이 건축디자인적 기능과 연관된 재료의 질감, 색채 등의 디자인적 특성을 고려할 수 있다. 또한 동일한 재료라고 하더라도 재료를 활용한 단면의 모양 등에 따라서 디자인효과를 의도할 수도 있겠다. 그러나 본 연구에서는 구조의 역학적 거동에 영향을 미치는 재료특성에 주목하고자 한다.

### 4.1 구조재료의 구조디자인적 특성

내력 구조체의 재료는 그 재료가 가진 강도와 변형방식(강성)이 전체 구조시스템에 미치는 영향을 고려하여 선정된다. 재료별로 태생적으로 저항할 수 있는 응력의 종류도 다르고 견뎌낼 수 있는 한계점인 강도도 다르다. 현재 가장 일반적으로 구조재료로 사용되고 있는 재료를 예로 하여 각 재료를 활용할 수 있는 구조시스템을 매치해보면 다음 <Table 8>과 같이 나타낼 수 있다.

<Table 8> Material features considering for structure design

Type of Structure System	Rigidity		Structural Material					
	Rigidity	Non-rigidity	Masonry	Timber	Steel (rolled or cable)	Concrete	R.C.	Membrane
Tension		✓		✓	✓			✓
Compression	✓		✓	✓	✓	✓	✓	
Flexure	✓			✓	✓		✓	
Truss	✓	✓		✓	✓			
Flexure +compression	✓			✓	✓		✓	
Flexure +tension	✓	✓		✓	✓			

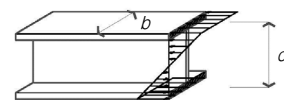
또한 힘에 대한 재료의 변형능력, 즉 강성 역시 디자인에서 우선적으로 고려되어야 하는 요소이다. 재료의 강성은 압축응력이 요구되는 조건에서는 필

수적이어서<Table 8 참조>, 구조시스템에 따라서 반드시 요구되는 강성조건이 존재한다. 그리고 강성 확보는 부재단면의 체적증가를 가져오기 때문에 구조디자인에 미치는 영향이 크다.

강성은 동일한 재료라고 할지라도 체적변화나 단면형상에 따라서 달라진다. 예를 들어 같은 강재라고 할지라도 철근처럼 적은 단면을 가진 강봉은 길게 사용되었을 때 유연하여 강성이 적은 부재가 되지만 동일한 단면적으로 형상을 제작한 경우에는 높은 단면 2차모멘트를 가져 강성부재가 되는 것을 설명할 수 있다.

### 4.2 힘재의 부재강성 변화에 따른 디자인 유형 및 사례 - $d/l$

힘구조시스템 안에서 부재는 발생하는 모멘트 만큼 적절한 휨강도와 휨강성을 가진 부재로 설계되어야 한다. 부재의 휨강성은 <Fig. 5>와 같이 인장과 압축이 발휘되는 연단부의 단면적과 그 사이의 거리인 깊이( $d$ )에 달려있다. 따라서 강성을 변화시키는 것은 이들 연단부의 폭 내지는 단면적을 변화시키거나 깊이를 변화시키는 것이다. 특히 깊이( $d$ )값은 발생하는 휨모멘트 뿐만 아니라 스패길이에 따른 처짐에 대한 저항값이므로, 재료에 따라 일정 깊이이상의 값이 요구된다. 따라서 휨강성을 대표하는 깊이( $d$ )값은 스패에 따른 비율,  $d/l$ 값으로 판단되며 이를 강성지표로써 고려할 수 있다. 일반적으로 직선형보의 경우, 재료에 따라서 약 1/15~1/20의 깊이를 필요로 한다.



<Fig. 5> Variables of flexure rigidity in the section of beam

앞서 구조입면형태의 변화를 살펴보았을 때 부재력에 따라 부재를 설계하고 각 모델의  $d/l$ 값을 <Table 2>와 <Table 4>에 나타낸 바 있다. 스패 20m를 가정한 본 논문의 해석모델에서 기본형 직선형을 취한 경우에는 부재의 깊이( $d$ )가 스패( $l$ )의 1/20에 달하는 약 1m의 부재가 요구되었다.

그리고 2장에서 살펴보았던 구조입면형태의 변화를 취하면 모멘트와 축력의 변화가 나타나므로 당연히 요구되는 부재의 강성지표,  $d/l$ 값 또한 변화하게 된다. <Table 2>에서는 현수연력도형을 취하는 경우의 부재강성을 알아본 것인데, 모멘트는 거의 없고 축력이 지배적인 경우이기 때문에 라이즈가 낮을수록  $d/l$ 값이 커지는데, 값의 범위가 1/57~1/110 정도로 연력도를 취한 경우, 축력이 증가함에도 불구하고, 매우 낮은 강성으로 구조를 이루어 낼 수 있다는 것을 알 수 있다. <Table 4>에서 비연력도형의 강성지표를 살펴보았을 때도, 연력도형에 비교적 가까운 원호의 경우, 산형보다 전반적으로 낮은 강성의 부재로 구조성립이 가능하며, 라이즈가 낮아 입면형이 비연력도형과 유사하면 할수록 강성지표가 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 <Table 5>에서 나타낸 일부 사례에서도 확인된다.

<Table 9> Types and examples of member rigidity design in relation to the connection type

	Moment Patterns with Connection type	Design with Member Rigidity	Examples
Fix point	1 point Cantilever Beam 		
	2 point Fixed beam 		
	3 point 		
Hin-ge point	2 point Simple beam 		
	Simple beam with cantilevers 		
4 point	Gerber Beam 		

결정된 구조입면형과 스펠에 따라 요구되는 강성확보가 구조체 디자인의 단순한 변수이기도 하지만, 이외에도 한 구간의 스펠 안에서 부재

단면의 강성을 변화시킴으로써 디자인을 다변화하는 수법도 많이 활용된다. 휨강성의 변화는 기본적으로 구조부재나 구조시스템 안에서 휨모멘트의 분배를 따라 이루어지는 것이므로 이 디자인 수법의 변화는 휨모멘트의 분배를 변화시키는 요인들과 밀접한 관계가 있다. 예를 들어, 휨모멘트의 분배를 크게 달리하는 하중조건이 있다거나, 지지점이나 접합방식의 변화로 인해 모멘트 분배가 달라지는 것을 부재의 강성변화를 이용하여 디자인적으로 활용하는 것이다. <Table 9>에서는 앞서 3장에서 보였던 접합과 휨모멘트 분포의 변화에 따라 부재강성을 활용한 디자인 유형 패턴을 사례와 함께 보였다.

부재강성의 변화는 사례에서 나타난 바와 같이 모멘트의 분배를 따른 부재깊이의 변화로 이루어지는 경우가 많은데, 독특한 사례로 이토요의 브루쥬 파빌리온에서 나타나는 것처럼, 깊이는 고정시키고 휨재의 폭(b)부분을 삭제하거나 보강하는 방법을 사용하여 라멘조의 강성변화를 의도하는 것도 가능하다.

## 5. 사각형 골조의 안정방식

### 5.1 안정방식의 구조디자인적 특성

안정성은 구조시스템이 주어진 강도를 발휘할 수 있도록 저항메카니즘을 유지하게 해주는 특성으로 주로 수평력에 대한 저항을 고려하는 방식으로 중요시되며, 구조의 필수요구조건 중에 하나일 만큼 중요한 구조계획의 고려사항이다. 특히, 안정성 문제는 기하학적으로 삼각형의 구성에서는 문제가 되지 않는다. 그러나 휨강성을 가진 부재가 수직부재와 결합하여 구성하는 일반적인 사각형의 라멘의 경우, 안정성문제가 각별히 고안될 필요가 있다. 때에 따라서는 연직하중에 대해 저항하도록 고안된 구조시스템과 별도의 수평력에 대한 안정구조시스템을 고려해야할 필요성이 제기되기도 하므로, 디자인적인 측면에서도 중요한 구조디자인 구성요소가 된다.

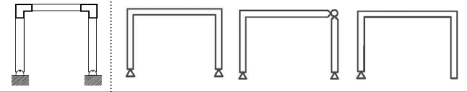
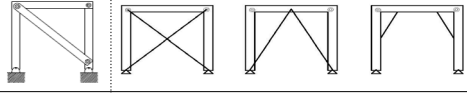
그리고 앞서 <Table 7>에서 나타낸 것처럼 접합점의 배치와 접합방식 또한 이 안정성에 영향을 미치고 그에 따라 구조디자인에도 영향을 미친다. 4개의 절점이 모두 힌지로 구성된 라멘조의 경우, 별도의 안정부재를 확보하여야만 구조시스템이 성립하

는 것이 그러한 예가 될 것이다. 안정구조시스템의 구성은 일단 구조시스템의 성립을 이루는 기본적인 요소이기도 하지만, 고층 건축물처럼 횡하중이 지배적인 구조물에서는 구조시스템의 전체 저항을 지배하는 중요한 결정요소가 되기도 한다.

### 5.2 안정방식 변화에 따른 구조디자인 유형 및 사례

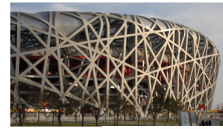
구조디자인에서 안정시스템을 확보하기 위한 구성 패턴은 다음 <Table 10>에서 나타낸 것처럼 크게 3가지가 존재한다. 안정방식은 수평하중에도 사각형의 형상을 유지하는 것이 목적인데, 이것은 근본적으로 접합부의 회전을 허락하지 않으면 각 부재의 충분한 모멘트 강성으로 얻어진다. 따라서 3장에서 언급한 접합방식이 안정방식에도 영향을 미치게 되며, 가장 기본은 전체 고정접합을 취하는 것이 된다. 3장의 <Table 7>에서 나타낸 것과 같이, 일부 힌지접합과 결합되면서 안정방식을 취할 수도 있다.

<Table 10> Types of stability system

Stability system	Type of Design
Fix Connection	
Brace Members	
Shear Wall	Arrangement ways in plan

이외에도 모든 접합을 힌지접합하면서도 가새나 전단벽 부재와 같이 안정 구조체를 추가하여 저항 성능을 얻어낼 수도 있다. 이때 추가적인 부재의 구성은 <Table 10>에 나타낸 것처럼 다변화될 수 있는데, 이것은 형태나 공간활용면에서 영향이 크고, 특히 횡하중의 영향이 큰 건축물의 경우에는 건축 계획 전반에 있어서 사전에 중요한 인자로 고려되어야 한다. 경우에 따라서는 이 안정방식을 디자인적인 효과를 의도하여 활용하는 사례 또한 볼 수 있어 그 대표적인 예를 <Fig. 6>에 나타내었다. 안정방식에 대한 구조디자인 지표는 단일부재의 강성, 층부재의 강성의 조합, 부재의 평면배열 상의 문제 등

고려해야할 변수가 다양하며, 특히 고층시스템으로 갈수록 그 영향이 크다. 따라서 향후 이 부분에 대한 심화된 연구가 요구된다.



Unique form design using braces in random

Beijing Olympic Stadium



Emphasis on form design attaching angel ties as the stability system

Renault Center

<Fig. 6> Examples of design using the stability structure systems

## 6. 요약 및 결론

본 연구는 보편적으로 사용하고 있는 휨 구조시스템에 있어서 구조디자인적인 측면에서 활용할 수 있는 디자인 구성요소를 탐색하고 각각의 요소들을 구조디자인에 반영하는 수법을 유형적으로 파악하고자 한 것이다. 휨 구조시스템의 디자인에 영향을 미칠 수 있는 구성요소로는 '구조입면형태', '정착 및 접합방식', '재료 및 부재강성', '안정방식'을 들고, 이들의 디자인 가능수법을 분석하였다. 세부적인 내용은 다음과 같이 요약된다.

1. '구조입면형태'는 하중을 따르는 연력도형과 그렇지 않은 비연력도형으로 구분되는데, 각 하중패턴의 경우에 대하여 스펠에 대한 입면형의 높이비 ( $f/l$ )에 따라 부재력과 반력의 변화를 파악하였으며, 구조디자인 지표로서, 수평반력계수를 고려한 연력도형과 중첩함으로써 모멘트도를 손쉽게 예측할 수 있음을 보였다.

2. 휨 구조시스템은 고정과 힌지접합 방식을 여러 절점위치에서 조합함으로써 모멘트 분배를 다양하게 변화시킬 수 있고 구조시스템의 디자인 및 안정방식에 영향을 미친다. 이 '정착 및 접합방식'을 활용한 휨 구조시스템의 디자인 수법을 유형적으로

나타내었다.

3. 휨 모멘트에 저항할 수 있는 '부재의 휨강성'은 재료특성외에도 부재단면의 형상, 깊이( $d$ )에 영향을 크게 받는데, 이는 스패에 대한 깊이비( $d/l$ )로 파악될 수 있어 이를 강성지표로 제시하였으며, 구조입면형태의  $f/l$ 에 따라 요구되는 강성지표 또한 파악하여 보였다. 또한 한 스패 안에서도 모멘트분배의 변화에 따라 부재강성을 변화시키는 구조디자인 유형을 제시하였다.

4. '안정방식'은 휨 구조시스템의 라멘조의 경우 민감히 고려되어야 하는 요소로서, 접합 구성방식이나 안정부재 추가, 또는 전단벽 배치가 활용가능한 디자인 수법임을 보였다.

가장 일상적으로 활용하는 휨 구조시스템에서 각 부재의 구성방식에 있어 힘과 디자인을 동시에 움직일 수 있는 이들 구조디자인 구성요소를 파악하고 이들의 가능 디자인 수법을 지표화하여 인식하는 것은 초기 건축 구조계획을 원활히 할 것이라 기대한다. 이로써 건축디자인에 있어 구조로부터 얻어지는 디자인 가능성을 한층 폭넓게 할 수 있다고 본다.

### 감사의 글

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

### References

1. J.Lee, "An Analysis on the Composition Pattern and Character of the Tensile Structure for Architecture Structural Planning", Doctoral Dissertation, Chung-Buk National University, 2004.
2. O. Buttner, et. al., "Bauwerk Tragwerk Tragstruktur", Ernst&Sohn, 1985.
3. J. Lee, "A Study on the Establishment Feature and the Development of Large Space Buildings in Korea", Journal of the Korean

- Association for Spatial Structures, 2009. 6.
4. O. Tetsuro et. al., "Zukai Ko Kozo no Zokei to Sekkei", Kimoondang, 2013.
5. M. Saitoh, "Story of Space and Structure", Kimoondang, 2005.
6. K. kaneda, "History of Structural Design", kennchiku kijyutu, 2010.
7. J.Lee, et. al, "Architecture & Structure", Kimoondang, 2010.
8. D. L. Schodek, 「Structures」, Prentice-Hall Inc, 1980.
9. W. Zalewski, et. al., "Shaping Structures : Statics", John Willy & Sons, 1998.
10. F. Moore, 「Understanding Structures」, McGraw-Hill, 1999.
11. F. D. K. Ching, et. al., 「Building Structures Illustrated」, John Willy & Sons, 2009.

- Received : January 27, 2016
- Revised : February 24, 2016
- Accepted : February 24, 2016