

L-system 모델을 이용한 대공간 구조물의 형태생성 방안

Shape Creation of Spatial Structures using L-system Model

김 호 수*
Kim, Ho-Soo

박 영 신**
Park, Young-Sin

이 민 호***
Lee, Min-Ho

한 철 희***
Han, Chol-Hee

요 약

본 연구에서는 morphogenesis 기법의 L-system 모델을 사용하여 대공간 구조물의 형태 생성 방안을 제공하고자 한다. 이와 같은 L-system 모델은 일반적으로 식물의 성장 과정을 시각화하기 위해 적용되어 왔으나 본 연구는 이를 건축 분야에 적용하기 위한 프로세스가 제안된다. L-system 모델은 크게 문자열 생성 단계와 문자열 분석 단계로 구성되어 있다. 문자열 생성 단계에서는 초기문자열로부터 최종 문자열을 생성하며, 문자열을 생성하기 위해서는 alphabet, axiom 및 rule에 대한 정의가 필요하다. 또한 문자열 해석 단계에서는 문자열의 의미 부여에 따라 다양하게 해석될 수 있다. 특히 다양한 적용 예제를 통해 대공간 구조물의 형태 생성 모델을 구현한다.

Abstract

This study presents the shape creation process using L-system model of morphogenesis technique. In general, L-system model has been applied to represent the visualization of biological plant. But, this study proposes the shape generation process of L-system model to apply the architectural field. The L-system model consists of two parts such as string generation step and string analysis step. The string generation step shows the process for a string rewriting. This step requires alphabet, axiom and rules to generate a string. Also, the string analysis step gives the meaning in string to generate various forms. Especially, through the various application examples, we can find out the shape creation models for the space structures.

키워드 : 형태생성, 모포제너시스, L-system 모델, 대공간 구조물

Keywords : Shape Creation, Morphogenesis, L-system Model, Spatial Structure

1. 서 론

최근 건축 구조물이 다양해짐에 따라 형상설계에 대한 관심이 증가하고 있으며 컴퓨터 프로그램의 발달과 함께 형태 생성기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이중 Morphogenesis기법은 자연 생명체가 자기성장을 통하여 다양하고 새로운 형태 및

패턴을 생성하는 것으로 생물학적인 형태를 건축물의 외양에 적용하기 위해 수학적 모델로 표현하기 위한 모델링 방안이다.¹⁾

Morphogenesis기법에 대한 연구는 처음엔 생물학 분야에서 시작되었고, 생물의 성장과정이나 거북이 등껍질 등과 같은 자연현상에서 얻어지는 형태를 가장 효율적이고 기능적이라는 점에서 연구가 시작되었다.²⁾ 현재에는 생물학 분야 이외에 다양한 분야에서 많은 연구가 이루어지고 있기 때문에 건축분야에서 건축 구조물의 형태 생성에 대한 적용방안이 새롭게 강구되고 있다.

Morphogenesis기법에는 Cellular Automata와

* 교신저자, 청주대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Tel : 043-229-8483 Fax : 043-229-8483
E-mail : hskim@cju.ac.kr

** 청주대학교 건축공학과 박사과정

*** 청주대학교 건축공학과 석사과정

L-system과 같은 형태생성 모델이¹⁾ 제안되어 있으나 본 연구에서는 문자열의 치환규칙에 의해 보다 쉽게 다양한 형태를 생성할 수 있는 L-system 모델을 적용하고자 한다. L-system 모델은 식물의 성장 과정을 모델링하기 위한 도구로서 단순한 문자열을 계속적으로 반복하여 복잡한 문자열을 만들고 형상을 생성하는 방법이다. 이 모델은 설계자가 설정해주는 초기 조건과 반복횟수에 따라 최종 문자열이 생성되며 생성된 문자열이 가지고 있는 의미에 따라 여러 가지 방식으로 해석될 수 있다는 점이 특징이다.

따라서 본 연구에서는 L-system 모델을 대공간 구조물의 형태생성에 적용하고 이를 다양한 예제에 적용함으로써 L-system 모델을 이용한 구조물의 형태생성 방안을 구현하고자 한다.

2. L-system 모델

2.1 L-system의 개념

Arisrid Lindenmayer³⁾에 의해 식물의 성장 과정을 시각화하기 위하여 제안된 것으로 L-system 이나 Lindenmayer-system⁴⁾으로 불린다. L-system은 식물의 성장 과정을 모델링하기 위한 도구로 정해진 문자와 치환규칙의 반복으로 복잡한 문자열이 생성되지만 최종적으로 식물의 성장 과정이나 자연 현상을 시각적으로 표현할 수 있다. 또한 초기 문자열(Axiom)로부터 치환규칙(Rule)을 반복적으로 적용함으로써 얻어진 최종 문자열은 문자에 따라 여러 가지 방식으로 모델링이 가능하다. L-system의 문자열은 왼쪽에서 오른쪽으로 해석되며 미리 정의된 치환규칙에 의해 초기 문자를 다시쓰기 시작하고 그 치환규칙은 반복적으로 적용된다.

L-system의 기본 구성은 G, P, w로 이루어져 있으며 Alphabet(G)은 문자 또는 변수들의 집합, Rules(P)은 치환규칙의 집합, Axiom(w)은 초기 문자 또는 초기 문자열로 정의된다.

2.2 L-system의 종류

다시쓰기 법칙에 근거를 둔 L-system은 초기 상태에서 정한 규칙에 따른 문자열의 치환을 통해 모델을 생성하기 때문에 문법을 기반으로 하는 모델링이라고도 한다. 이러한 L-system은 다양하게 발전해 왔으며, 그 치환규칙이 적용되는 방법에 따라 문맥 독립적 L-system과 문맥 의존적 L-system 등으로 구분될 수 있다.

2.2.1 문맥 독립적 L-system

문맥 독립적 L-system에서는 치환규칙을 정의하는 방법에서 치환하고자 하는 문자열에서 어떤 상징 문자를 만나게 되면 바로 치환규칙을 적용하는 방법이다. 예를 들어 (1)식과 같은 기본적인 초기 조건을 가진다면 a는 bc로 치환된다.

$$\begin{aligned} \text{Alphabet}(G) &: a, b & (1) \\ \text{Axiom}(w) &: a \\ \text{Rules}(P) &: a \rightarrow bc \end{aligned}$$

2.2.2 문맥 의존적 L-system

문맥 의존적 L-system은 치환 대상 문자뿐만 아니라 치환 대상 문자의 좌측, 우측문자를 비교하여 치환 규칙을 만족하였을 경우에만 문자는 치환이 된다. 이 방법은 문자열의 좌우 문맥 등을 고려해야 하기 때문에 적용이 문맥 독립적 L-system보다는 어렵지만 다양하고 복잡한 효과를 줄 수 있다. 예를 들어 (2)식과 같은 기본적인 초기 조건을 가진다면 b의 좌측에 a, 우측에 c가 있을 경우에만 b를 d로 치환할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Alphabet}(G) &: a, b, c, d & (2) \\ \text{Axiom}(w) &: a\langle b \rangle c \\ \text{Rules}(P) &: a\langle b \rangle c \rightarrow d \end{aligned}$$

3. L-system을 이용한 형태생성 방안

L-system은 문자 되쓰기 시스템으로 초기 조건과 간단한 규칙을 통해 복잡한 생물의 성장을 표현할 수 있다. 본 연구에서는 문맥 독립적 L-system 모델을 이용하여 구조물의 형태를 생성하는 방안을 제시하고자 한다.

3.1 L-system의 구성

L-system은 문자열 생성단계와 해석단계로 구성되어 있다. 문자열 생성 단계를 통해 각각의 문자들을 조합하여 최종 문자열을 생성하고, 문자열 해석 단계를 통해 시각적으로 형태를 생성한다.

3.1.1 문자열 생성 단계

문자열 생성 단계에서 중요한 부분은 문자 되쓰기를 수행하는 것으로 초기문자열로부터 치환규칙의 반복적인 적용에 의하여 최종 문자열을 생성한다. 문자열을 생성하기 위해 문자들의 집합(V), 초기 문자열(Axiom), 치환규칙(P), 반복횟수(R)와 같은 기본적인 데이터를 설정한다.

3.1.2 문자열 해석 단계

L-system의 주요 특징은 문자에 의미를 어떻게 부여하는가에 따라 다양하게 해석될 수 있다는 것이다. 문자열 해석 단계에서는 L-system의 이런 특징을 이용하여 다양한 형태를 생성할 수 있도록 문자에 의미를 부여한다.

3.2 형태 생성 방안

본 연구에서는 구조물의 형태를 생성하기 위해 두 가지의 의미부여 방안을 제시하고자 한다.

3.2.1 문자를 절점의 좌표로 가정하는 방안

이 방안은 문자에 의미 부여시 문자를 절점의 좌표로 가정하는 것이다. 생성된 문자에 구조물 좌표와 관련된 데이터를 적용하면 절점이 생성되고 이 절점들은 부여된 의미에 따라 규칙적으로 배열되거나 비규칙적으로 배열된다. 배열된 절점은 약속된 규칙에 따라 절점의 연결이 이루어지고 최종적인 형태가 생성된다.

이에 대한 예를 살펴보면, <표 1>과 같은 기본 데이터를 설정한 후 문자열 생성 단계를 수행한 결과 <표 2>와 같은 최종 문자열을 얻었다. <표 3>은 문자열 해석을 위해 형태 생성에 사용되는 문자와 그 문자의 의미를 설명하고 있는 것으로 문자열 생성 단계를 통해 $+-+G+FG+-+FG+-G+FG$ 와 같은 최종문자열 얻은 후 각 문자에 의미를 부여한다. 여기서, 각 문자에 대입된 것은 구조물의 절점 좌표 값이다. 또한, 다양한 형태의 구조물을 생성하기 위해 “zvar”와 “da”라는 파라메타를 도입한다. 예를 들어, “zvar”와 “da” 파라메타를 이용하지 않으면 <그림 1(a)>와 같은 정형적인 형태를 가지는 평면 골조가 생성되며, 반면에 “zvar”와 “da” 파라메타를 이용하게 되면 <그림 1(b)>와 같은 비정형적인 형태를 가지는 골조 구조가 생성된다.

<표 1> 초기 조건

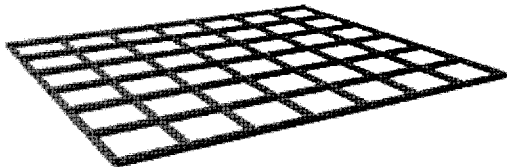
사용될 문자 집합(G)	F, G
초기문자(w)	G
치환규칙(P)	$F \rightarrow -G, G \rightarrow +FG$
반복수	4

<표 2> 문자열 생성

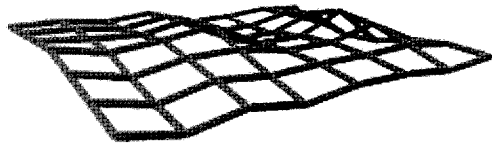
Axiom	G
time 1	+FG
time 2	$+-G+FG$
time 3	$+-+FG+-G+FG$
time 4	$+-+G+FG+-+FG+-G+FG$

〈표 3〉 의미부여 방안

구분	문자	의미부여
절점 생성	F	$zvar \times \sin(aT)$
	G	$zvar \times \cos(aT)$
절점의 z 방향 길이 제어	+	$aT = aT + da$
	-	$aT = aT - da$



(a) 정형적인 형태



(b) 비정형적인 형태

〈그림 1〉 문자를 절점의 좌표로 가정한 형태생성

3.2.2 문자를 부재연결이 되어 있는 단위 모듈로 가정하는 방안

이 방안은 문자를 부재연결이 되어 있는 단위 모듈로 가정하는 것이다. 문자에 의미 부여시 문자를 부재연결이 되어 있는 단위 모듈로 가정하고 여러 단위 모듈의 조합에 의해 형태가 생성된다.

이에 대한 예를 살펴보면, 문자열 생성 단계를 수행하기 위해 〈표 4〉와 같은 기본 데이터를 설정한 후 나온 결과는 〈표 5〉와 같다. 문자열 생성 단계를 통해 FGFGHFGFGHHFHFFG와 같은 최종문자열 얻은 후 〈표 6〉과 같이 각 문자에 의미를 부여한다.⁵⁾ 여기서, 각 문자는 하나의 단위 모듈로 가정되며 각 모듈은 앞뒤 문자와의 관계에 의해 크기가 결정된다. 문자열 해석 단계를 거쳐 나온 형태생성 결과, 단위 모듈의 크기가 동일하다고 가정하면 〈그림 2(a)〉와 같은 형태를 얻을 수 있고 모듈의 크기가 다르다고 가정하면 〈그림 2(b)〉와 같다.

〈표 4〉 초기 조건

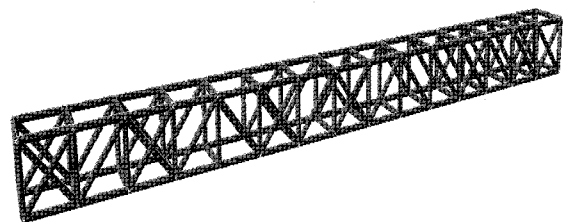
사용될 문자 집합(G)	F, G, H
초기문자(w)	G
치환규칙(P)	F → FG
	G → FGH
	H → HF
반복수	3

〈표 5〉 문자열 생성

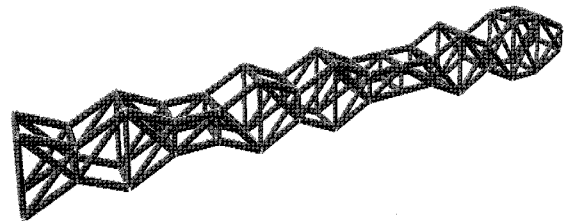
Axiom	G
time 1	FGH
time 2	FGFGHHF
time 3	FGFGHFGFGHHFHFFG

〈표 6〉 의미부여 방안

구분	문자	의미부여
단위 모듈 생성	F	
	G	
	H	



(a) 동일한 크기의 단위 모듈



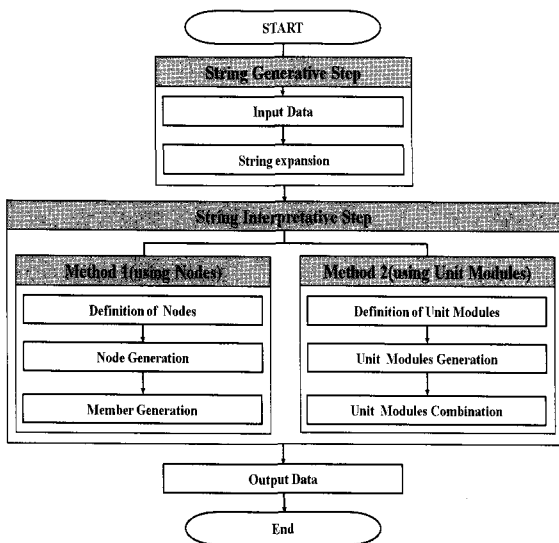
(b) 동일하지 않은 크기의 단위 모듈

〈그림 2〉 문자를 단위모듈로 가정했을 경우의 형태생성

3.3 L-system을 이용한 형태 생성 프로세스

본 연구에서는 구조물의 형태 생성을 위해 문자를 절점의 좌표로 가정하는 방안과 문자를 부재연결이 되어 있는 단위 모듈로 가정하는 방안을 함께 제시한다. 이는 <그림 3>과 같은 프로세스를 통해 수행되며, 문자열 생성 모듈과 문자열 해석 모듈 두 가지 단계로 구분하였고 세부 사항은 다음과 같다.

- 1) 문자열을 생성하기 위해 문자들의 집합(V), 초기 문자열(Axiom), 치환규칙(P) 등과 같은 입력 데이터를 설정한다.
- 2) 문자 되쓰기 시스템에 의해 초기 문자열은 다수의 문자열로 확장되며 반복과정에 의해 최종적인 문자열이 생성된다.
- 3) 생성된 최종 문자열을 대상으로 문자열 해석 단계를 수행한다. 문자열 해석 단계는 문자를 절점의 좌표로 가정하는 것과 문자를 부재연결이 되어 있는 단위 모듈로 가정하는 두 가지 방안이 있고 이 중 필요한 방안을 선택 한다.
- 4) 문자열 해석 단계를 통해 형태 생성이 완료되면 그 결과를 데이터로 저장한다.



<그림 3> L-system에 의한 형태 생성 프로세스

4. 적용 예제

4.1 문자를 절점좌표로 가정한 예제

여기서는 문자를 절점의 좌표로 가정하는 방안을 이용하여 스페이스 프레임 형태를 생성한다.

4.1.1 평판 스페이스 프레임 형태 생성(Single Layer)

1) 문자열 생성 단계

Single-Layer의 평판 스페이스 프레임 형태를 생성하기 위해 <표 7>과 같은 입력데이터를 설정한다.

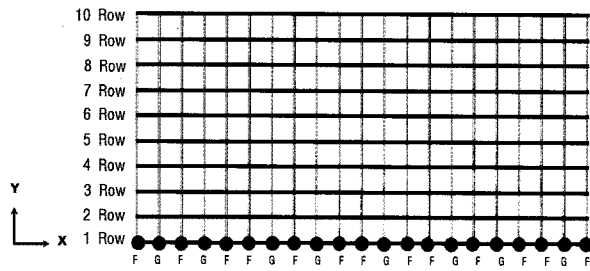
<표 7> Input Data

Input Data	Value
사용될 문자 집합(G)	F, G
치환규칙(P)	$F \rightarrow -G-F, G \rightarrow +F$
초기문자(w)	F
반복수	6

6번의 반복과정을 거치면서 <표 8>과 같이 각 단계별로 문자열을 얻을 수 있었으며 최종적인 문자열은 time 6의 결과이다. 또한 문자열 생성 결과는 <그림 4>에 표시된 각 행의 절점에 위치하는 것으로 가정하며, 이 때 +, - 기호는 제외된다.

<표 8> String Expansion

time 0	F
time 1	-G-F
time 2	--+F--G-F
time 3	---+G-F---+F--G-F
time 4	----+F--G-F----+G-F---+F--G-F
time 5	-----+G-F---+F--G-F-----+F--G-F- ---+G-F---+F--G-F
time 6	-----+F--G-F---+G-F---+F--G-F- ----+G-F---+F--G-F-----+F--G-F- ---+G-F---+F--G-F



〈그림 4〉 문자열 배치도

2) 문자열 해석 단계

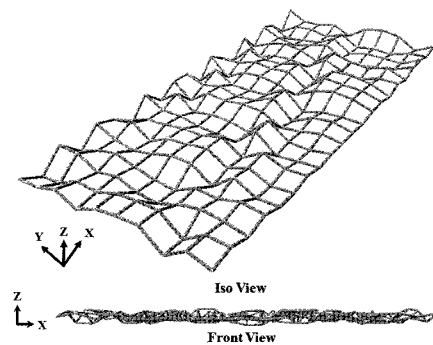
문자열 생성 단계를 통해 최종적인 문자열을 얻은 후 이를 대상으로 문자열 해석 단계를 수행한다. 문자열 해석 단계를 통해 기본적인 문자 데이터를 구조물의 형태로 시각화한다. 문자열 해석을 위한 데이터는 〈표 9〉와 같고 설계 파라메타의 사용 여부에 따라 모델을 Case 1과 Case 2로 구분하였다. Case 모델과 설계 파라메타는 〈표 10〉과 같다. 형태를 생성한 결과 설계 파라메타를 이용한 Case 1 모델은 〈그림 5(a)〉와 같이 비정형 형태를 가지며 Case 2 모델은 〈그림 5(b)〉와 같이 정형 형태를 가진다.

〈표 9〉 String Interactive Data

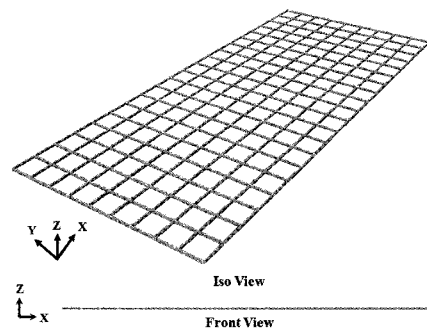
F	$zvar \times \sin(aT)$
G	$zvar \times \cos(aT)$
+	$aT = aT + da$
-	$aT = aT - da$
X 방향 단위 부재 길이	1000 mm
Y 방향 단위 부재 길이	1000 mm
X 방향 분할 수	생성된 문자열 수 - 1
Y 방향 분할 수	9

〈표 10〉 Design Parameter

Model	Parameter	Value	
Case 1	zvar	1, 7 Row	200 mm
		2, 6, 8 Row	300 mm
		3, 5, 9 Row	400 mm
		4, 10 Row	500 mm
	da	1 Row	10°
		2 Row	20°
		3 Row	30°
		4 Row	40°
		5 Row	50°
		6 Row	60°
Case 2	zvar	7 Row	70°
		8 Row	80°
	da	9 Row	90°
		10 Row	100°
Case 2	zvar	none	
	da	none	



(a) Case 1



(b) Case 2

〈그림 5〉 Single-Layer의 평판 스페이스 프레임 형태생성

4.1.2 평판 스페이스 프레임 형태 생성(Double Layer)

1) 문자열 생성 단계

Double-Layer의 형판 스페이스 프레임 형태를 생성하기 위해 <표 11>과 같은 입력데이터를 설정한다.

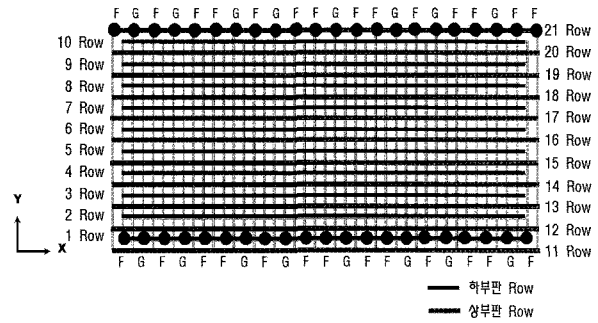
<표 11> Input Data

Input Data	Value
사용될 문자 집합(G)	F, G
치환규칙(P)	$F \rightarrow +G+F, G \rightarrow -F+$
초기문자(w)	G
반복수	7

7번의 반복과정을 거치면서 <표 12>와 같이 각 단계별로 문자열을 얻을 수 있었으며 최종적인 문자열은 time 7의 결과이다. 또한 문자열 생성 결과는 <그림 6>에 표시된 각 행의 절점에 위치하는 것으로 가정하며, 이 때 +, - 기호는 제외된다.

<표 12> String Expansion

time	String
time 0	G
time 1	-F
time 2	-+G+F
time 3	--F++G+F
time 4	---+G+F+++F++G+F
time 5	----F++G+F+++G+F+++F++G+F
time 6	-----+G+F+++F++G+F+++F++G+F ++++G+F+++F++G+F
time 7	-----F++G+F+++G+F+++F++G+F ++++F++G+F+++F++G+F+++F++G+F



<그림 6> 문자열 배치도

2) 문자열 해석 단계

본 모델에서 생성된 문자열을 해석하기 위해 <표 13>과 같이 문자열 해석 데이터를 설정하였다. 또한, <표 14>와 같이 설계 파라메타의 사용 여부에 따라 모델을 Case 1과 Case 2로 구분하였다.

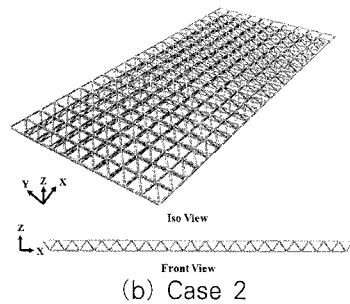
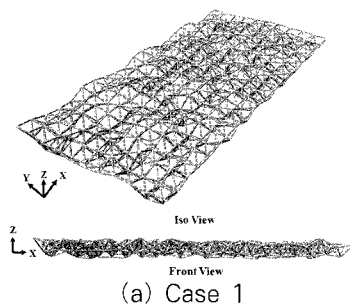
형태를 생성한 결과 설계 파라메타를 이용한 Case 1 모델은 <그림 7(a)>와 같이 비정형 형태를 가지며 Case 2 모델은 <그림 7(b)>와 같이 정형 형태를 가진다.

<표 13> String Interactive Data

F	$zvar \times \cos(aT)$
G	$zvar \times \sin(aT)$
+	$aT = aT + da$
-	$aT = aT + da$
X 방향 단위 부재 길이	1000 mm
Y 방향 단위 부재 길이	1000 mm
Z 방향 높이	700 mm
X 방향 분할 수	생성된 문자열 수 - 1
Y 방향 분할 수	9

〈표 14〉 Design Parameter

Model	Parameter	Value				
Case 1	zvar	하부판	1, 7 Row: 200 mm 2, 6, 8 Row: 300 mm 3, 5, 9 Row: 400 mm 4, 10 Row: 500 mm			
		상부판	11~21 Row: 300 mm			
		da	하부판	1 Row: 10° 2 Row: 20° 3 Row: 30° 4 Row: 40° 5 Row: 50° 6 Row: 60° 7 Row: 70° 8 Row: 80° 9 Row: 90° 10 Row: 100°		
				상부판	11 Row: 110° 12 Row: 120° 13 Row: 130° 14 Row: 140° 15 Row: 150° 16 Row: 160° 17 Row: 170° 18 Row: 180° 19 Row: 190° 20 Row: 200° 21 Row: 210°	
	za				하부판: none 상부판: none	
					da	하부판: none 상부판: none



〈그림 7〉 Double-Layer의 평판 스페이스 프레임 형태생성

4.2 문자를 단위모듈로 가정한 예제

여기서는 문자를 부재연결이 되어 있는 단위 모듈로 가정하는 방안을 이용하여 아치 트리스 형태를 생성한다.

4.2.1 문자열 생성 단계

아치 트리스 구조물을 좌우 대칭으로 가정하고 좌측과 우측 영역에 대하여 문자열을 생성한다.⁶⁾ 이를 위한 입력데이터는 〈표 15〉와 같다. 대칭이기 때문에 치환규칙과 반복수는 동일하며 사용된 문자만 다르게 설정한다.

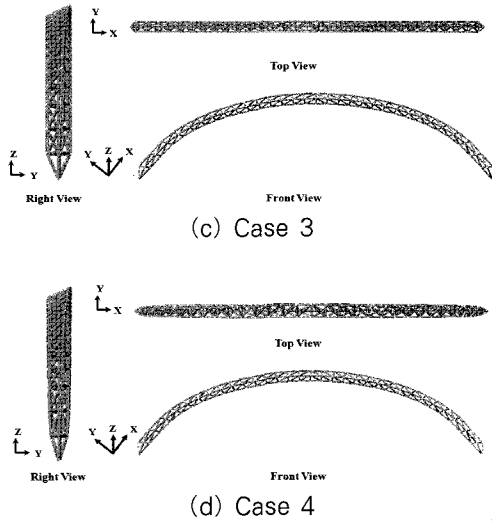
〈표 15〉 Input Data

Input Data		Value
사용될 문자 집합(G)	좌측영역	F, G
	우측영역	H, I
치환규칙(P)	좌측영역	F → FF G → GF
	우측영역	H → HH I → IH
초기문자(w)	좌측영역	G
	우측영역	I
반복수		4

문자열 생성 결과는 〈표 16〉과 같고 문자열 해석 단계에서 사용될 최종적인 문자열은 time 4의 결과이다. 또한 아치 트리스 구조물의 생성에 사용될 문자열의 배치는 〈그림 8〉과 같다.

〈표 16〉 String Expansion

time 0	G
	I
time 1	GF
	IH
time 2	GFFF
	IHHH
time 3	GFFFFFFF
	IHHHHHHH
time 4	GFFFFFFFFFFFFFFF
	IHHHHHHHHHHHHHHH



〈그림 11〉 아치 트러스 형태생성

5. 결 론

본 연구에서는 Morphogenesis 기법 중 L-system 모델을 이용하여 다양한 구조물의 형태생성방안을 제시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 대공간 구조물의 형태생성을 위해 Morphogenesis 기법 중 L-system 모델을 사용하였으며, L-system의 문자열에 의미를 부여하고 문자열의 치환규칙을 정립하였다.
- 2) L-system 모델의 문자열 치환규칙과 $zvar, da$ 라는 파라미터를 도입하여 문자를 절점좌표로 가정한 예제와 문자를 단위모듈로 가정한 예제로 구분하여 각각에 대한 형태생성 방안을 강구하였다.
- 3) 문자를 절점좌표로 가정한 경우는 평판 스페이스 프레임 구조물에 적용하였다. 그 결과 Single-Layer 및 Double-Layer 모두 설계파라미터를 적용하지 않은 경우 정형적인 형태를 갖는 구조물이 생성되며, 설계파라미터를 적용한 경우 비정형적인 형태를 가지는 구조물이 생성되었다.
- 4) 문자를 단위모듈로 가정한 경우는 아치 트러스 구조물에 적용하였다. 여기서는 문자에 부여된

의미와 수직 부재의 각도, 부재의 기울어짐 및 변단면 형태를 설계파라미터로 설정하여 다양한 형태를 가진 아치 트러스 구조물이 생성되었다.

- 5) 이와 같이 L-system 모델은 건축 구조물의 형태생성에 적용 가능성을 알 수 있었고, 본 연구를 확장하여 스페이스 프레임 구조물뿐만 아니라 정형 및 비정형의 다양한 형태를 가지는 대공간 구조물의 초기설계에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호 #06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

- 참고문헌 -

1. 양명규, 이민호, 한철희, 박영신, 김호수, "구조물의 형태생성을 위한 Morphogenesis 기법의 활용방안", 대한건축학회, 학술발표대회논문집, 39권 1호, 2010
2. 김호수, 박영신, 양명규, "구조물의 형태 생성과 Morphogenesis 기법", 공간구조학회, 학술기사, 2010
3. J. Mishra and S. Mishra, L-System Fractals, Elsevier Science Ltd, 2007
4. Markus K. Kangas, "Modeling Surface and Structure Growth Using Lindenmayer Systems in a 3-D Environment, Advanced Undergraduate Project, May 16, 1999
5. 최선영, 박선우, 박찬수, 최취경, "건축구조 디자인 요소로서 다면체의 형태구성에 관한 연구", 공간구조학회, 6권 2호, 2006
6. 민현정, 조성배, "구조적 방향성 그래프와 대화

형 유전자 알고리즘을 이용한 3차원 꽃의 생성”,
정보과학회논문집, 소프트웨어 및 응용, 31권 3
호, 2004

7. J. von Neumann, The Theory of Self
Reproducing Automata, A. Burks(ed.), Univ.
of Illinois Press, 1966
8. S. Wolfram, Cellular Automata and Complexity,
Addison Wesley Publishing Company, 1994

(접 수 일 자 : 2011년6월24일)

(심사완료일자 : 2011년8월23일)

(게재확정일자 : 2011년8월31일)