특집

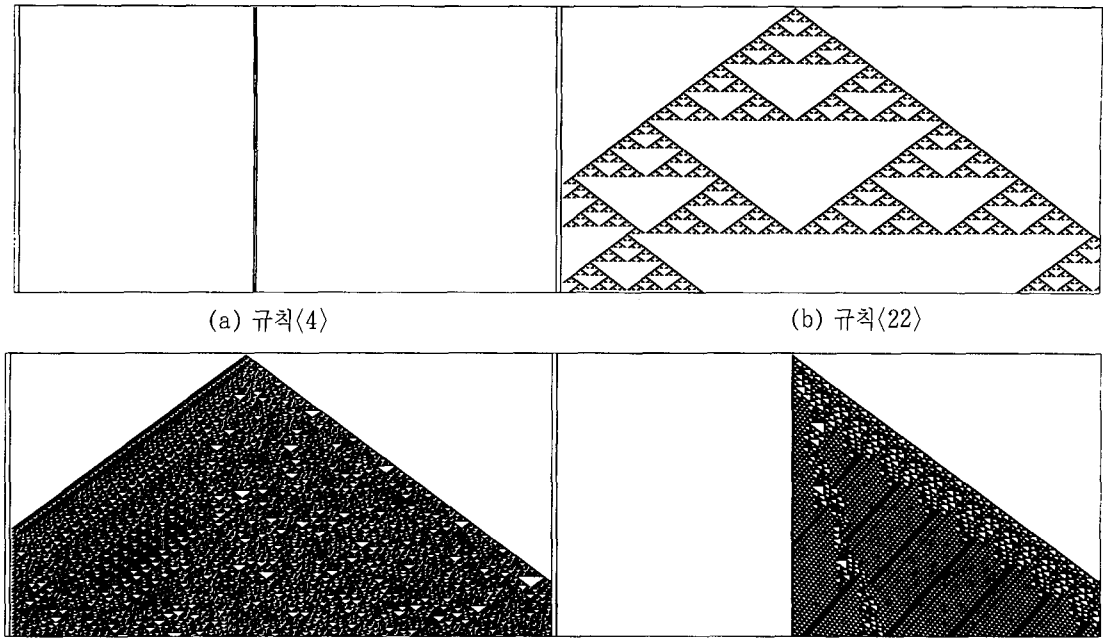
CELLULAR AUTOMATA

姜 勳
中央大學校 制御計測工學科

I. 서 론

최근 '인공생명(Artificial Life)'이라는 새로운 장르의 테크놀로지가 무수한 신조어의 숲에서 그 싹을 터 나가고 있다. 인공생명이란 자연계 생명시스템의 행동특성을 나타내는 '인공합성시스템(man-made system)'에 대한 새로운 연구분야이다. 즉, 인공생명은 컴퓨터, 로봇, 전자, 기계, 분자화학, 물리학, 그리고 인간이 만든 여러 가지 미디어를 사용하여 생명이 지닌 특성과 유사한 지능, 적응, 진화, 자기복제 등의 관련된 현상을 연구하는 학문이다. 이는 컴퓨터나 다른 인공매체들을 사용하여 생명과 유사한 특징을 합성함으로써 기존의 생명과학에서 나타나는 여러 가지 기능을 인공적으로 유도하고자 하는 것이다. 인공생명의 연구는 이른바 '우리가 알고있는 생명(Life-as-we-know-it)'의 영역을 넘어서 '생명이라고 여겨지는 것 (Life-as-it-could-be)'의 영역까지 그 범위를 확장함으로써 이 두 가지 모두를 보다 잘 설명하고 예측하며 그 이해도를 높이는 데 있다.[1] 바로 이 광범위하고 넓은 영역 안에서 우리가 생물학의 일반적 이론을 찾아내어 공학적인 관점에서 이를 실제적이고 유용하게 적용할 수 있어야 하고, 어려운 최적화 문제를 해결하는 데 '자연의 영감(靈感)'이라는 알고리듬을 이용한다. 인공생명은 생명에 대한 포괄적인 연구이외에도 자기합성, 사회적 조직체, 문화적 진화 및 생태의 동적 특성, 성장 및 발전, 로봇과 동물의 행동 등을 다루며, 신경망 모델, 진화 연산, 복잡성 이론, 퍼지 시스템, 복잡한 동적 시스템, 군 집단 로봇, 카오스 시스템, 인공지능 등의 다양한 분야와 밀접한 연관성이 있다.

컴퓨터의 발전과 더불어 인공생명의 시각에서 자연을 보는 새로운 관점이 생겨났는데, 이는 자연을 계산상의 형태로 나타내고자 하는 것이다. 즉 우리는 객체를 단순한 컴퓨터로 간주하고 각 컴퓨터는 그 나름대로의 법칙을 가지게 된다. 이러한 계산상의 메커니즘을 Cellular Automaton이라고 하며, 이는 상호작용하는 인접한 cell들(각 cell은 automaton 즉 컴퓨터 기능을 가진다)사이의 분포



(a) 규칙〈4〉 (b) 규칙〈22〉

(c) 규칙〈30〉 (d) 규칙〈124〉

〈그림 1〉 1차원 Cellular Automata의 4가지 천이규칙에 따른 결과

를 나타내는 것이다. Cellular Automata는 공간적으로 확장되어 있는 시스템이고, 전체적으로 평형점, limit cycle, 카오스 등의 비선형 동적 특성을 모두 보여준다. 또한 정보역학의 복잡한 형태를 보편적으로 나타낼 수 있는 메커니즘이다. 미국과 일본, 유럽 여러 나라에서는 이에 대한 활발한 연구가 진행중이나 한국의 경우에는 진화 연산과 유전 알고리듬 등의 연구논문과 적용사례가 발표되고 있으나, Cellular Automata의 연구는 미비한 편이며, 인공생명의 관점에 의해 집단 모빌 로봇의 협조행동이나 복수 개체의 특성에 대한 연구는 계속 증가하는 추세이다. 해외의 연구는 Wolfram[2,3]의 1차원 Cellular Automata를 4가지로 분류한 것을 필두로, Langton[4]의 λ파라미터, 복잡한 계산을 수행할 수 있는 2차원 Cellular Automata[4,5], 생명시스템은 카오스의 경계점 근처에서 정연한 제도적 조직을 갖고, 자연적 선택이 이 균형 잡힌 상태에서 이루어진다는 가설을 세운 Packard[6]와 Kauffmann[7], Crutchfield[8]의 진화하는 Cellular Automata(EVCA)에 대한 연구, 그리고 그밖의 것들[9]이 있다. 그림 1.은 1차원 Cellular Automata에서 4가지 천이규칙에 대한 cell배열의 변화를 도식적으로 그린 것이다. (a)는 고정점, (b)는 주기성, (c)와 (d)는 비주기성의 카오스패턴[10]을 보이고 있다.

여기서, II절은 Cellular Automata의 전반적인 설명과 예를 들었으며, III절은 Cellular Automata의 대표적인 적용이라고 볼 수 있는 생명게임(Game of Life)과 범용 소프트웨어에 대해 다루었다. IV절의 결론에서는 향후의 연구과제에 대해, 부록에서는 인공생명과 Cellular Automata에 관련된 World-Wide Web Site를 소개하였다.

II. Cellular Automata

이제 Cellular Automata의 정의 및 구조, 수학적 표시방법, 기능 및 성질, 그리고 예를 살펴보자.

〈표 1〉 CA의 3가지 구성요소에 대한 정의

CA의 구성요소	구성요소의 정의
STATE (상태)	상태는 cell이 가질 수 있는 한정된 수의 등급을 표시하는 변수이며, 이를 사용하여 숫자나 성질을 나타내게 할 수 있다. 예를 들어 각 cell이 어떤 단위 지역을 대표한다면, 상태는 그 위치나 숲에서 사는 동물의 수라고 표시할 수가 있다.
NEIGHBORHOOD (주변)	주변은 서로 영향을 미치는 cell의 집합이며, 격자 내에서는 한 cell에 대해 가장 물리적으로 가까운 cell들을 나타낸다. 다음은 2차원 구조의 CA에서 cell 'c'에 대한 주변 cell들('n'으로 표시)의 간단한 예이다: n n c n n n n n n c n n n n n n n n n n c n n n n n n
RULES/PROGRAM (규칙/프로그램)	프로그램은 현재 한 cell의 상태와 그 주변 상태에 대해서, 그 cell의 다음 상태를 결정하는 데 필요한 규칙의 집합이다. 가능한 규칙의 개수는 상태 수의 주변 cell들의 개수에 대한 지수함수 꼴로 나타낼 수 있다. 일반적으로 규칙은 다변수의 논리함수로 표시할 수 있다.

정의 : (Cellular Automata)

Cellular Automaton은 인접한 cell들과 상호작용하는 동일하게 프로그램된 cell들의 컴퓨터 배열이다. 이는 각 cell마다 유한상태 오토마타(finite state automaton)를 갖춘 D-차원의 격자(lattice)이다. 여기서 Cellular Automaton의 배열은 일반적으로 띠모양의 1차원구조, 2차원 그리드구조, 또는 3차원 입체구조 등의 공간적 형태를 가지고 있으며 시간에 따라 전체적인 분포가 변화한다. Cellular Automata(이하, CA라고 함)의 기본적 구성은 표 1.에 나타나 있는 바와 같이, 상태(state), 주변(neighborhood), 그리고 규칙(rules)의 세 가지로 되어 있다.

CA는 공간, 시간, 상태가 모두 이산적인 동적 시스템이다. 일정하게 배열된 공간 격자의 점을 cell이라고 부르며, 이 점들은 유한개의 상태중의 한가지를 가질 수 있다. 격자 구조 속의 cell상태는 국부적인 규칙에 의해 수정(update)되는데, 다시 말해서, 주어진 시간에 cell상태는 바로 한 단계 이전 시간의 그 cell상태와 근처의 주변 cell들의 상태에 의해서만 변화한다. 그리고 격자내의 모든 cell들은 동기적인 시간에 따라 수정된다. CA는 그 원형을 von Neumann[1]의 자기복제(self-reproduction)에서 찾을 수 있으며, CA 역시 자기복제의 기능을 가지고 있다.

우선, 1차원 CA에 대하여 알아보자. Σ를 k개의 상태를 가진 집합, Z를 양의 정수 집합이라고 하면, 1차원 CA는 Σ^Z의 형태를 갖는다. 그리고, CA의 동적 시스템의 전역적 수정 함수 Φ는

$$\Phi : \Sigma^Z \rightarrow \Sigma^Z$$

로 표시할 수 있으며, 주변에서 작용하는 국부적 함수 ϕ는 r을 cell주변의 반경이라고 할 때,

$$\phi : \Sigma^{2r+1} \rightarrow \Sigma$$

로 정의된다. 국부적 수정 함수 ϕ는 주변반경 r과 병행하여 동작하는 수정규칙이며, 그 정의구역과 치역이 모두 유한하다. 따라서, CA의 함수들은 모두 일종의 유한한 lookup 테이블을 사용하여 결정할 수 있다. Cell상태 σ_i는 원시부호집합 $\Sigma \equiv \{0,1,\cdots,$

$k-1\}$의 원소이며, i번째 cell σ_i에 대한 새로운 cell과 전역적 수정 함수는 국부적 수정 함수들로부터 다음과 같이 구한다:

$$\sigma_i^{new}=\Phi_i(\sigma_i)=\phi(\sigma_{i-r},\cdots,\sigma_{i+r})$$

$(2r+1)$개의 부호로 구성된 부호띠 $\eta_i=\sigma_{i-r}\cdots\sigma_{i+r}$를 자 부호(child symbol) σ_i^{new}의 부모 주변(parent neighborhood)이라고 하며, 국부적 수정 규칙은 $\sigma_i^{new}=\phi(\eta_i)$로 다시 쓸 수 있다. 서로 다른 순서쌍 $(\eta,\ \sigma)$의 집합을 규칙테이블이라고 한다. 수학적 관점에서 CA의 특징을 살펴보면, 첫째로 기본공간 Σ^Z는 compact하고, 전역적 천이함수 Φ는 연속적이다. 둘째로 map Φ는 shift연산에 대해 교환법칙이 성립한다. CA의 상태 s는 유한하거나 무한한 배열의 구조이며, $s\in\Sigma^Z$이다. 따라서, $s^{new}=\Phi s$라고 쓸 수 있고, 유한한 Z에 대해서는 경계조건이 필요하게 된다. 예를 들면, 주기적 경계조건을 사용할 수 있다. CA의 가장 간단한 것을 Elementary CA (ECA)라고 부르며, 이 경우$(k,\ r)=(2,\ 1)$로서, 가장 가까운 주변에 의해서만 천이가 이루어지며, 상태는 0,1 의 이항분포이므로 가능한 부모 주변의 수는 $k^{2r+1}=8$이 된다. 그리고, 각각의 주변에 대해서 k개의 자식 cell의 상태가 가능하므로 전부 $k^{k^{2r+1}}$개의 국부적 수정 규칙이 존재하게 된다. 그러므로, 서로 다른 $2^{2^3}=256$개의 ECA규칙이 가능하다. 예를 들어, 규칙지수<18>을 갖는 ECA는 다음의 규칙 테이블을 사용하게 된다: $(00010010_{(2)}=18_{(10)})$

주변 cell들:	111	110	101	100	011	010	001	000
	$\sigma_{i-1}\sigma_i\sigma_{i+1}$							
다음 cell상태:	0	0	0	1	0	0	1	0
	σ_i^{new}							

여기서, 상태수 k가 8개이고 주변의 개수가 $2r+1=5$인 경우, $8^5=32K(K=1024)$의 가능한 부모 주변 수를 갖게 되고, CA 규칙은 $8^{32K}\simeq10^{30K}$의 천문학적인 큰 수가 됨을 알 수 있다. 따라서, CA 규칙 공간은 잠재적으로 '무한히' 큰 가능성을 내포한다는 사실을 깨닫게 된다. 시간 t일때 CA 격자 전체를 $L(t)=\{s(t)|s(t)=\Phi s(t-1),\forall s(t-1)\in L(t-1)\}$로 정의하면, 임의의 초기 격자조건 $L(0)$에 대해서, 시간 t의 CA 격자는

$$L(t)=\Phi L(t-1)=\Phi^t\ L(0)$$

로 표시할 수 있으며, Φ를 앙상블 진화 연산자(ensemble evolution operator)라고 한다. 대부분의 CA의 연산자는 'Many-to-One' 함수로 볼 수 있으므로, 비가역적(irreversible)이거나 발산적(dissipative)이다. 이 비가역성은 카오스 행동[12]을 보이는 CA의 전형적인 특징이다. 일반적으로, D-차원 CA는 주변 cell의 격자구조만 그 차원이 증가하며, 위에서 서술한 내용과 동일하다. 단, 국부적 천이 함수 ϕ가 다음과 같이 표시된다:

$$\phi:\Sigma^N\rightarrow\Sigma$$

여기서, N은 D-차원의 격자구조속에서 자신과 주변 cell들을 포함한 집합이다.

우선, 다음과 같이 1차원 CA의 간단한 예를 들어보자:

상태 : 0 또는 1(k=2, 즉 1 bit)

주변 : 두 개의 인접 cell(r=2, 2r+1=3, 즉 n c n 형태)

규칙 : 임의의 cell상태와 그 주변상태에 대한 가능한 국부적인 수정규칙에 의해 새로 형성된 cell 상태를 나타낸다. 위의 경우, 2개의 상태를 가진 3개의 cell들, (n c n)은 $2^3=8$개의 규칙이 필요하다. 표 2는 규칙의 한 예가 나타나 있으며, 1차원

〈표 2〉 1차원 CA의 규칙〈54〉

ncn		c^{new}
0 0 0	→	0
0 0 1	→	1
0 1 0	→	1
0 1 1	→	0
1 0 0	→	1
1 0 1	→	1
1 1 0	→	0
1 1 1	→	0

〈표 3〉 규칙<54> 1차원 CA격자 상태의 진화

시간	1차원 CA 공간
0	■
1	■ ■ ■
2	■ ■
3	■ ■ ■ ■ ■
4	■ ■ ■
5	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■
6	■ ■ ■

CA의 경우 함수의 다음 상태(c^{new})가 $00110110_{(2)}=54_{(10)}$이므로 규칙<54>라고도 한다.

표3는 초기조건이 하나의 cell상태만 1이고 나머지는 모두 0인 경우에 시간에 따라 위에서 정의된 1차원 CA배열이 어떻게 변화하는 지를 보여준다: (상태 1인 경우 검게 표시함)

위의 예에서 CA의 성질을 살펴보면, 첫째, 자기조직(self-organization)의 특징이 있다. 즉, 시간이 지남에 따라 연속적으로 cell상태를 보면, 불규칙한 상태배열에 대해서 프로그램에 따라 어떤 패턴이 생성되어 나가는 것을 관찰할 수가 있다. 둘째, 생명과 유사한 행동(life-like behavior)을 들 수가 있다. Wolfram과 다른 석학들의 경험적 연구에 의하면 아무리 단순한 1차원 CA라도 복잡한 생물학적 시스템의 특성을 보이는 것으로 알려져 있다. 예를 들어, CA의 임의 초기형태에 대한 운명은 소멸(사망)하고, 안정화되고, 특정주기를 가지고 반복하며, 일정속도를 가지고 성장하거나, 불규칙하게 발전과 쇠퇴를 거듭한다. 셋째, 열적 특성(thermal characteristics)이 있는데, 이는 상태변화를 유도하는 CA모델들이 부분적으로는 격자형태에 대해 고정된 패턴으로 결빙시키는 한편, 대부분의 격자형태에 대해서는 확산시키는 활성가스와 같은 성질을 보이기 때문이다.

1차원 CA의 규칙 공간은 λ파라미터($0\leq\lambda\leq1$)를 사용하여 그 정성적 특성을 파악할 수 있다.[3] 임의의 상태 $s_Q\in\Sigma$를 선택하여 이를 정적 상태(quiescent state)라고 하자. 천이함수 ϕ를 사용하여 이 특별한 정적 상태 s_Q에 n_Q번의 천이가 발생하였다고 하자. 그리고, 나머지 상태들인 $\Sigma-s_Q$에 대해서 $k-1$상태의 변화가 일정하고 불규칙하게 발생하여, k^z-n_Q번의 천이가 CA 격자에 채워졌다고 하자. 여기서, 파라미터는 다음과 같이 정의된다.[4]:

$$\lambda=\frac{k^z-n_Q}{k^z}=1-\frac{n_Q}{k^z}$$

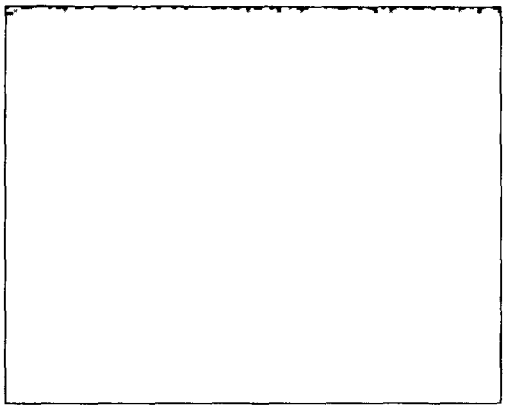
(i) $\lambda=0$: $n_Q=k^z$이면 ϕ함수의 모든 천이가s_Q에서 발생하여 $\lambda=0$이 된다.

(ii) $\lambda=0$: $n_Q=0$이면 s_Q에 전혀 천이가 발생하지 않았으므로 $\lambda=1$이 된다.

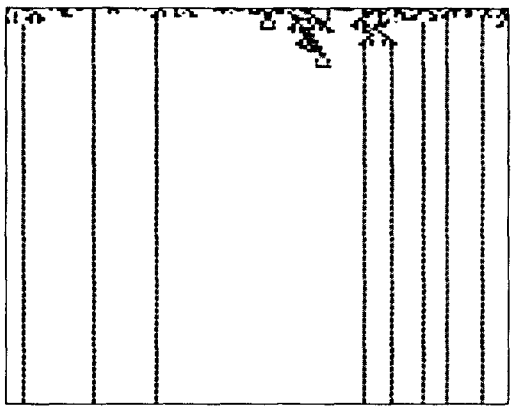
(iii) $\lambda=1-\frac{1}{k}$: $n_Q=k^z/k$이면 모든 상태가ϕ함수안에서 동등하게 표시될 경우이므로 $\lambda=1-k^{-1}$이 된다.

그림 2는 4개의 상태와 5개의 주변 cell들을 갖는 1차원 CA에서 λ파라미터를 변화시켰을 때, 패턴의 시간적 추이를 보여준 것이다. CA 규칙 공간에 대한 Wolfram의 4가지 분류[3]는 고정된 평형상태의 Class I CA, 간단히 분리된 주기적 구조를 갖는 Class II CA, 카오스적인 비주기 패턴의 Class III CA, 그리고 분리된 구조의 매우 긴 과도현상과 복잡한 패턴을 갖는 Class IV CA로 나눌 수 있는데(그림 3. 참조), 이를 Langton[4]이 λ파라미터를 가지고 잘 설명하였다. λ의 범위는 $0\leq\lambda\leq1-k^{-1}$에서 그 의미를 찾을 수 있으며, 그림 4에서 처럼 작은 λ값은 고정점을 나타내고, 이 λ값이 커질수록 정보 엔트로피가 증가하다가 λ_c에서 최대로 되고 이 값이 다시 증가하면, 복잡한 정도가 다시 감소하는 것을 알 수 있다. 카오스 상태에 돌입하기 바로 직전인 Class IV CA의 λ_c에서 이른

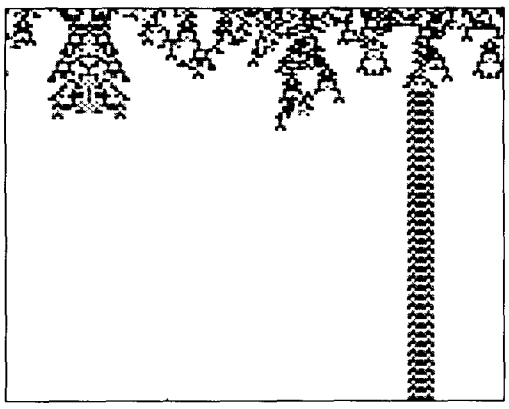
바 생명현상을 관찰할 수가 있으며 이를 'Edge of Chaos' 또는 'Maximal Complexity'라고 한다. λ를



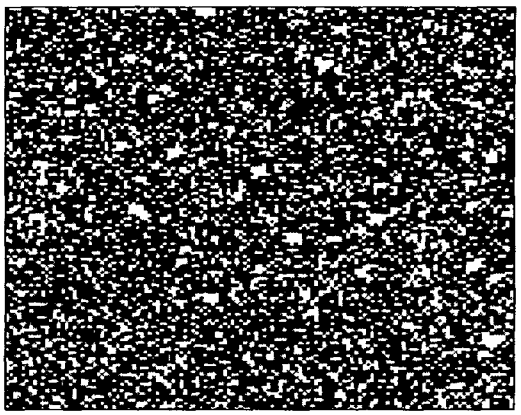
(a) λ=0.1



(b) λ=0.3



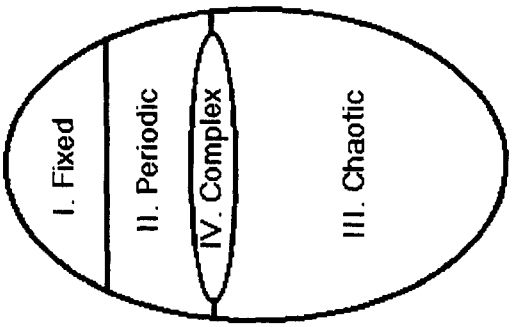
(c) λ=0.5



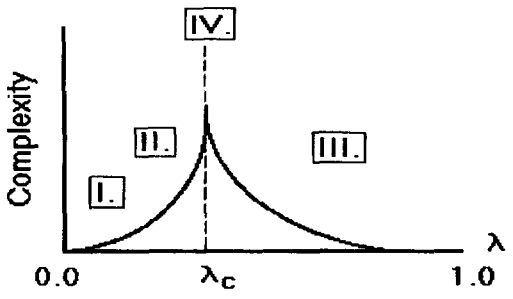
(d) λ=0.7

〈그림 2〉 상태 4, 주변 5인 1차원 CA의 ◓파라미터 변화에 따른 패턴

사용하여 천이 함수 ϕ를 만드는 방법에는 random-table 방식과 table-walk-through방식이 있다.[4]



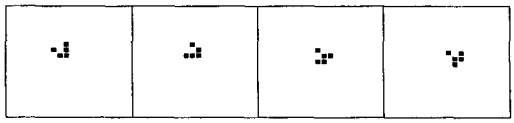
〈그림 3〉 CA 규칙 공간에 대한 Wolfram의 분류



〈그림 4〉 CA 규칙공간에서 ◓에 대한 복잡도

2차원 CA : 글라이더(glider)

글라이더는 격자내에서 4가지 모습으로 교대로 변화하며, 대각선 방향으로 움직이는 2차원 CA의 일종이다. 이는 8개의 주변 cell들을 가지고 있으며, 움직이는 각 패턴들은 서로 대칭성을 띠고 있는 것이 특징이다. 그림 5에 글라이더가 우하귀쪽으로 진행하는 모습이 나타나 있다.



〈그림 5〉 2차원 CA 글라이더의 시간에 따른 움직임

상태 : 0 또는 1(k=2, 즉 1 bit)

주변 : 8개의 인접 cell(#(N)=9 즉

$n_1\ n_2\ n_3$
$n_4\ c\ n_{35}$ 의 형태)
$n_6\ n_7\ n_8$

규칙 : 2개의 상태를 가진 9개의 주변 cell들에 의해 $2^9=512$개의 규칙이 필요하다. 그러나 '0'을 정적 상태로 간주하고, '1'인 경우만을 규칙으로 표시한 것이 표 4에 나타나 있다.

〈표 4〉 2차원 CA 글라이더의 규칙(상태변화가 '1'이 되는 경우만을 보임)

n_1 n_2 n_3	n_4 c n_5	n_6 n_7 n_8	c^{new}
0 0 0	0 0 1	1 0 1	⟶ 1
0 0 1	0 0 0	0 1 1	⟶ 1
1 0 1	0 1 1	0 0 0	⟶ 1
1 0 0	0 1 0	1 1 0	⟶ 1
0 1 0	0 1 0	1 1 0	⟶ 1
0 0 1	1 1 1	0 0 0	⟶ 1
0 1 0	1 1 0	0 0 0	⟶ 1
1 0 0	1 0 0	1 0 0	⟶ 1
1 1 1	0 0 0	0 0 0	⟶ 1
0 0 1	0 1 1	0 0 0	⟶ 1
0 0 0	0 1 0	1 1 0	⟶ 1
0 0 0	1 0 0	0 1 1	⟶ 1
0 1 0	0 0 1	0 0 1	⟶ 1
0 1 1	1 1 0	0 0 0	⟶ 1
0 1 0	1 1 0	1 0 0	⟶ 1
0 0 0	1 1 0	1 0 0	⟶ 1
0 1 1	0 1 0	0 0 0	⟶ 1
1 1 0	1 0 0	0 0 0	⟶ 1
therwise			⟶ 0

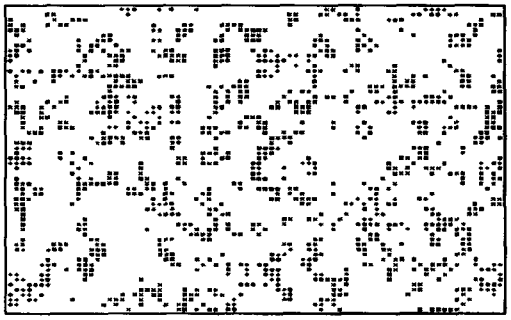
초기조건 : 상태가 '1'인 Cell들의 개수 = 5, 여기서 (i, j)를 격자안의 임의 위치라 할때, 초기위치 $\{(x,y)\}=\{(i,j+1),(i+1,j+2),(i+2,j),(i+2,j+1),(i+2,j+2)\}$

III. 생명게임(Game of Life)

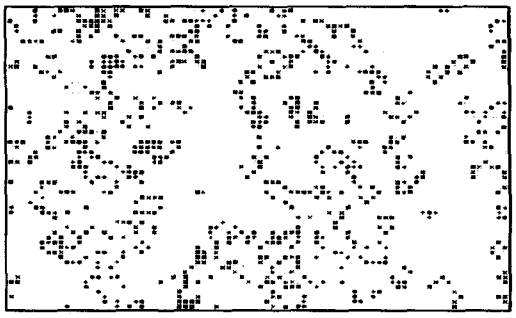
생명게임은 John H. Conway에 의해 만들어진 2차원 CA이다. 생명게임은 CA이론에 기초하여 컴퓨터가 간단한 출생과 사망의 법칙으로부터 연속적이고 빠른 변환을 만들어내는 시뮬레이션 게임이다. 이는 간단한 사각형의 매트릭스나 그리드상에서, 그 안에 있는 어떤 cell이 주변의 8개의 다른 cell들이 비어있거나('0') 차있는('1') 상태의 영향을 받아 자신의 상태를 '0'(사망) 또는 '1'(출생)로 바꾸어 나가는 것이다. Conway의 특수한 규칙들은 생명에 대한 열쇠이며 (i) 무한히 패턴이 발산하지 않도록 하고, (ii) 많은 패턴이 점차 사라지지 않도록, 이 두 가지 극단을 피하기 위해 수년동안 조심스럽게 선택한 법칙들이다. 이렇게 섬세한 균형속에서 전혀 예측할 수 없고 다양한 활동력을 가진 모델을 만들어 내었다. 다음과 같이 생명게임 LIFE의 규칙은 cell들의 공간격자와 cell의 생성과 소멸을 조절하는 규칙들로 이루어져 있다 :

1. 공간격자 안에 생명체가 분포된 임의의 cell에 대해 주변 cell의 숫자를 세어서
   {1−i} 주변 cell의 개체수가 0 또는 1 이면, 그 cell은 "외로움" 때문에 죽는다.
   {1−ii} 주변 cell의 개체수가 2 또는 3 이면, 그 cell은 다음 세대로 살아남는다.
   {1−iii} 주변 cell의 개체수가 4 또는 그 이상이면, 그 cell은 "인구밀집"으로 죽는다.
2. 공간격자 안에 비어있는 임의의 cell에 대해 주변 cell의 숫자를 세어서
   {2−i} 주변 cell의 개체수가 정확히 3 이면, 그 cell은 생명체가 생성된다.

위와 같은 간단한 법칙에 의해서 임의의 초기 분포에 대하여, 생명체의 창발적이고 복잡한 행동이 발생하게 된다. 다음의 그림 6.은 생명게임 LIFE의 변화하는 패턴을 보인 것이다:



(a) 초기패턴의 LIFE 분포

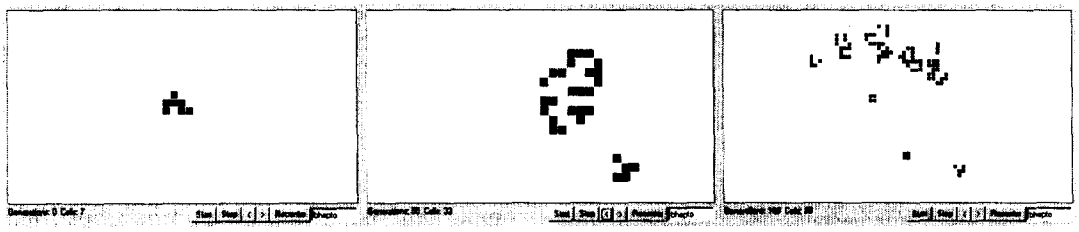


(b) 약 50단계후의 LIFE 분포

〈그림 6〉 Conway의 LIFE 시뮬레이션

비록 생명게임의 규칙들은 복잡하지 않지만, 간단한 초기 패턴으로부터 매우 복잡한 생명 형태가 나타난다. 시뮬레이션에서 나타나는 것과 같이 개체가 움직인다거나, 자신을 복제해 나가는 등의 현상을 보여주고 있다. 그리고, 간단한 초기 패턴들이 충분한 시간 후에 성장과 변화를 거쳐, 안정한 형태를 보이거나 둘 또는 그 이상의 주기적인 과정에 돌입하는 것이 가능하도록 되어 있다. 간단히 말해서, 이 규칙들은 인구를 예측할 수 없도록 만들어져 있다. Conway의 유전법칙은 각 cell이 4개의 대각선 방향과 4개의 동서남북방향의 주변 cell들에 의해서만 영향을 받으므로 매우 단순하다. 모든 출생과 사망이 동시에 일어난다는 것은 여기서 아주 중요하며, 또 초기구성에 대한 전체의 생명역사에서 이러한 한 번의 움직임이 하나의 세대(generation)를 이룬다. 초기에 즉 0 세대의 패턴은 어떤 것을 선택하더라도 무방하며, 이 후로는 생명게임의 규칙을 따르게 된다. 인구 분포의 변화는 기묘하고, 때때로 아름다우며, 항시 예측할 수 없는 것들이 끊임없이 연속된다. 드물지만 '사회'가 결국 소멸되어 사라져 버리는 경우도 있다. 대부분의 초기패턴은 소멸되지 않고 안정된 모양의 정체 생명(still life)이나 영원히 주기적으로 진동하는 패턴을 이룬다. 그리고, 처음에는 대칭적이지 못했던 패턴도 나중에는 대칭성을 띠는 경향이 있다. 한 번 발생한 대칭성에 대하여는 그 규모가 증가할지언정 결코 없어지지 않는다. 생명게임에서는 수많은 패턴을 사용하여 시뮬레이션을 수행할 수가 있는데, 다음에 이들 중 몇가지를 소개한다.

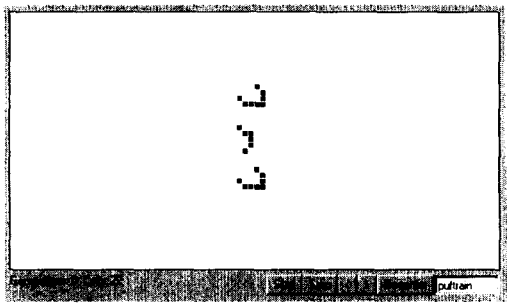
B-heptomino : 다음에 7개의 초기 cell을 갖는 B-heptomino를 예로 들었는데, 이는 생명게임에서 성장하는 경향을 보여주기 위해 사용되는 간단한 생명게임이다. 그림 7.에 각각 (a) 0세대, (b) 50세대, (b) 100세대일 때 패턴이 부드럽게 퍼져나가는 것과 cell들이 증가하는 모습을 보이고 있다.



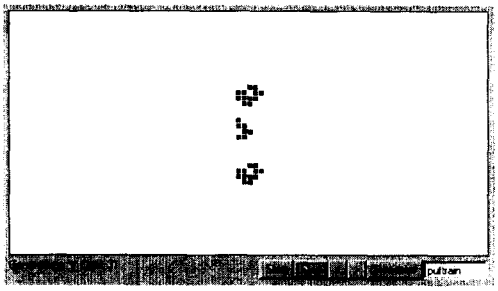
(a) Generation : 0, Cells : 7 (b) Generation : 50, Cells : 33 (c) Generation : 100, Cells : 89

〈그림 7〉 B-heptomino 의 초기패턴에 대한 생명게임

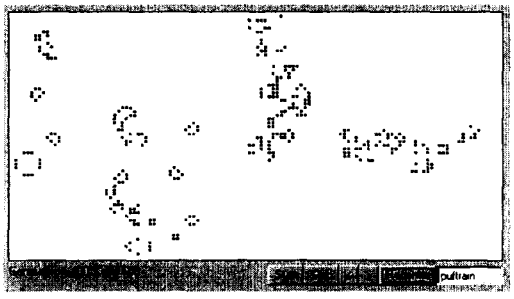
증기 기관차(puffer train) : 이 증기 기관차는 단순히 위의 B-heptomino를 변형시켜 만든 패턴이다. 이 생명게임의 명칭은 생성되는 cell의 전파되는 방향의 반대 쪽에 증기 기관차에서 뿜어져 나오는 연기모양으로 확산되어 나가기 때문에 붙여졌다. 그림 8은 각각 (a) 0세대, (b) 1세대, (c) 400세대, (d) 999세대일때의 패턴과 만들어진 새로운 cell들을 보여주고 있다. 그림 9에 증기기관차(puffer train)가 800세대 지난 후에 나타난 전체 패턴을 보였으며, 역시 생명게임의 천이규칙을



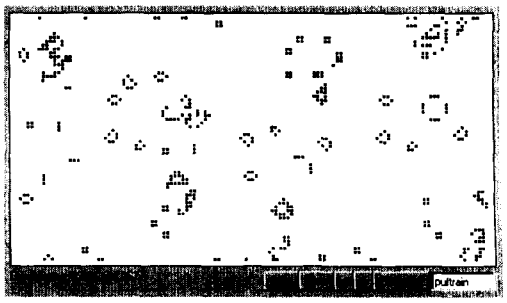
(a) Generations : 0, Cells : 22



(b) Generations : 1, Cells : 31



(c) Generations : 400, Cells : 609



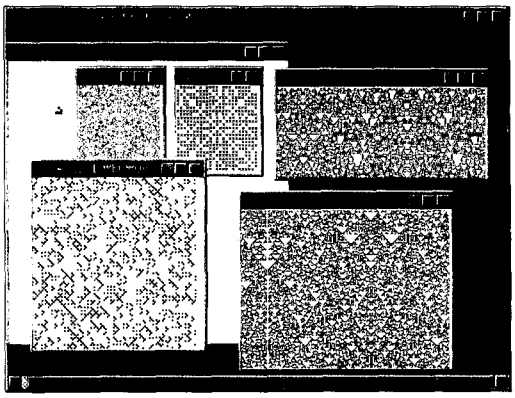
(d) Generations : 999, Cells : 2677

〈그림 8〉 Puffer Train의 생명게임

〈그림 9〉 Puffer Train : Generation 800에서 전체적인 2차원 공간의 생명게임

적용한 예이다. 여기서는 그림의 시작점인 왼쪽 끝 부분에서부터 400 cell단위 떨어진 오른쪽 부분에 초기 패턴(0 세대)과 정확히 같은 모양이 나타나 있다.

범용 CA 시뮬레이터 : 지금까지 수많은 범용 CA 시뮬레이터가 개발되어 있는데, 대표적인 것으로는 automata, CALAB, CAMEX, CAM Simulator, CART, CAT, Cellsim, CELLULAR, CEPROL, CINC, ddlab, LCAU, Lindenmeyer Systems, scamper, SimLife, SLANG, Wauton 등이 있다. 그리고, 생명게임 시뮬레이터로는 bugglings, Life, lifelab, CASim, Plife, 3dlife, xlife-2.0 등이 있다. 다음에 나와있는 그림 10.은 CAU-CAS라는 IBM/PC의 윈도우즈 3.x/95용 CA 시뮬레이터의 화면을 보인 것으로, 다른 CA의 프로그램들과는 달리 1차원 CA와 2차원 CA를 모두 통합한 시스템이다. 이 프로그램은 필자가 개발한 것으로, 격자구조의 파라미터, 천이 규칙, 초기 cell의 위치 등을 텍스트파일로 입력하여 1차원 및



〈그림 10〉 CAU-CAS 1차원/2차원 CA 시뮬레이터의 화면

2차원 CA자료를 읽어들여서 시뮬레이션을 수행할 수 있는 장점이 있다. CAU-CAS는 홈페이지 주소 http : //viking.cie.cau.ac.kr/ 로 연결하거나 직접 텔넷이나 FTP를 사용하여 ftp : //juno.cie.cau.ac.kr/pub/alife/ 에서 받아볼 수 있다.

IV. 결 론

지금까지 1차원 CA의 구조와 수학적 정의 및 성질, 그리고 이를 분석하는 데 필요한 λ파라미터, 2차원 CA와 생명게임에 대해서 알아보았다. 여기서, λ의 특정값에 대해 예측이 불가능한 유사 생명력이 왕성해지는 것과 CA 규칙 공간의 엄청난 잠재력을 알 수 있었다. 우리는 생명게임에서 보는 바와 같이 CA가 최근에 얼마나 많은 발전을 해왔는가를 보고 놀라지 않을 수 없다. 간단한 규칙에 의해 수행된 컴퓨터 시뮬레이션으로 자기 조직성, 자기 복제, 성장과 소멸 등의 다양하고 복잡한 생명이라고 여겨질 수 있는 여러 가지 특성을 볼 수가 있었다. 앞으로 CA의 연구 동향은 진화하는 구조를 가진 Evolving CA(EVCA), 천이 규칙에 퍼지시스템을 사용한 Fuzzy CA(FCA), 그리고 신경망의 구조를 가진 Cellular Neural Net(CNN) 등으로 그 이론 및 응용분야가 확장되어 나갈 것이며, 생명게임은 예술분야 및 멀티미디어 계통에 응

부록 : ALIFE 와 CA에 대한 WWW 홈페이지

	World-Wide Web (WWW) 홈페이지 목록
ALIFE	http : //alife.santafe.edu/ http : //reality.sgi.com/employees/craig/alife.html http : //www.cogs.susx.ac.uk/users/ezequiel/alife-page/alife.html http : //www.wi.leidenuniv.nl/CS/LP/alea.html http : //www-mitpress.mit.edu/jrnls-catalog/artificial.html http : //www.st.rim.or.jp/~kanada/AL-index.html http : //www.ai.mit.edu/people/cmaley/alife/ http : //ssie.binghamton.edu/~rocha/ss504-02.html http : //www.krl.caltech.edu/~charles/cns175/ http : //www.fusebox.com/cb/alife.html http : //lumpi.informatik.uni-dortmund.de/alife/
CA	http : //alife.santafe.edu : 80/alife/topics/ca/caweb/ http : //rucs2.sunlab.cs.runet.edu : 80/~dana/ca/ca.html http : //www.rwcp.or.jp/people/yk/CA/home.html http : //www.santafe.edu/projects/evca/ http : //www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/ai-repository/ai/areas/ca/0.html http : //flicker.chem.human.nagoya-u.ac.jp : 8001/~jun/science/hexlife.html http : //complex.csu.edu.au/complex/ http : //www.fourmilab.ch/autofile/www/chapter2—75.html http : //bitmed.ucsd.edu/carf.html http : //dinf.vub.ac.be/dinf/academic/courses/ai2/cellular.html http : //godel.hws.edu/xJava/CA/

용될 것이다. 특히, 자기복제 및 합성이 가능한 로봇이 개발된다면, CA를 군 집단 로봇에 적용하여 협조 지능, 적응 및 진화, 그리고 창발적인 행동을 구현할 수 있을 것으로 예측된다.

참 고 문 헌

[1] C. Langton, "Artificial Life" *in Artificial* Life, C. Langton(ed.), Addison-Wesley, pp.1-47, 1989.

[2] S. Wolfram, "Computational Mechanics of Cellular Automata", World Scientific Press, 1984.

[3] S. Wolfram (ed.), *Theory and Application of Cellular Automata*, World Scientific Press, 1986.

[4] C. Langton, 'Life at the edge of chaos", In *Artificial Life II, C.* Langton (ed.), pp. 41－91, 1992.

[5] C. Langton, "Computation at the edge of chaos : phase transitions and emergent computation", in *Emergent Computation,* S. Forrest (ed.), MIT Press/North Holland, vol.42, pp.12－37, 1990.

[6] N. Packard, "Adaptation to the edge of chaos", *In Complexity in Biological Modelling,* S. Kelso and M. Shleginger (eds.), 1988.

[7] S. A. Kauffmann, *The Origins of Order : Self-Organization and Selection in Evolution*, Oxford Press, 1993.

[8] M. Mitchell, P. T. Hraber, and J. P. Crutchfield, 'Revisiting the edge of chaos : Evolving cellular automata to perform computations", Complex Systems, vol.7, pp. 89-130, 1993.

[9] T. Toffoli and N. Margolus, *Cellular Automata Machines*, MIT Press, 1987.

[10] F. C. Moon, *Chaotic and Fractal Dynamics : An Introduction for Applied Scientists and Engineers*, New York : John Wiley & Sons, Inc., 1992.

[11] J. von Neumann, *The Theory of Self-Reproducing Automata*, A. Burks (ed.), Univ. of Illinois Press, 1966.

[12] J. Guckenheimer and P. J. Holmes, *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of Vector Fields*, Springer-Verlag, 1983.

저 자 소 개

姜 勳

1959年 11月 19日生
1982年 2月 서울대학교 공과대학 전자공학과 졸업(학사)
1984年 2月 서울대학교 공과대학대학원 전자공학과 졸업(석사)
1989年 9月 미국 조지아공대 대학원 전기공학과 졸업(박사)

1989年 9月～1990年 9月 미국 조지아공대 박사후과정(Research Fellow)
1990年 9月～1992年 2月 미국 조지아공대 연구교수(Research Associate)
1991年 1月～1991年 12月 미국 Automation Concept & Systems 연구원
1992年 3月～1995年 2月 중앙대학교 공과대학 제어계측공학과 조교수
1992年 9月～현재 한국 퍼지 및 지능시스템 학회 재무위원
1995年 3月～현재 중앙대학교 공과대학 제어계측공학과 부교수
1997年 1月～현재 제어, 자동화, 시스템 공학회 편집위원

주관심 분야 : 퍼지시스템 및 제어, 신경망인식 및 제어, 지능 로봇, 인공생명, 진화연산, 카오스 시스템