

CA-GIS 통합시스템의 설계와 구현*

박수홍**

Design and Implementation of an Integrated CA-GIS System

Soo-hong PARK

요 약

셀룰라 오토마타(CA)는 복잡계(complex system)의 특성과 행태를 분석하거나 시뮬레이션 하기 위해 고안된 이론적 체계로 자연과학 및 공학의 여러 분야에서 연구되어 왔다. 최근 GIS 분야에서는 CA가 가지고 있는 시공간적 동적 모델 구현의 개념적 우수성과 래스터 GIS와의 유사성에 근거하여 CA와 GIS를 이용한 다양한 모델링 연구가 발표되고 있다. 그러나 대부분의 연구에서 개발된 CA모델들은 GIS의 제한된 기능을 바탕으로 구현되어 CA가 가지고 있는 장점들을 충분히 활용하고 있지 못하며 실제적인 모델링 연구에 활용될 수 있는 통합시스템이 개발되어 있지 않다. 본 연구에서는 CA를 GIS의 모델링 엔진으로 결합하여 동적 공간 모델링 혹은 시뮬레이션을 수행할 수 있는 범용의 CA-GIS 통합시스템을 개발하였다. 이러한 CA-GIS 통합시스템은 GIS의 동적 공간 모델링 기능을 대폭 보완할 수 있을 것으로 기대되며 도시성장 예측모델 개발과 같은 실제적인 모델링 연구 수행에 효과적인 도구로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT : Cellular Automata(CA) have been investigated and utilized as a theoretical framework and/or methodology for analyzing and simulating the properties and behaviors of many complex systems in various physical science and engineering fields. Due to the conceptual elegance and effectiveness of implementing spatio-temporal dynamic models and the compatibility with raster GISs, recently a variety of modeling works using both CA and GIS have been published in GIS fields. Most of spatial dynamic models introduced in previous research, however, were very limited and furthermore integrated CA-GIS systems for

* 본 과제는 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-51300-001-3) 지원으로 수행되었음.

** 인하대학교 공과대학 지리정보공학과 전임강사(Dept. of Geoinformatic Engineering, Inha University, 253 Yonghyun Dong, Nam Gu, Incheon, Korea, 402-751, Tel.(032)-860-7605)

practical modeling purposes are not developed yet. This study aims to develop an integrated CA-GIS system in which a CA simulator is used as an analytical engine for GIS providing a multipurpose spatial dynamic modeling functionalities. This integrated CA-GIS system is anticipated radically enhancing the current lacking dynamic modeling functionalities of GIS and being utilized as an powerful and effective tool for practical spatial dynamic modeling research.

Keywords : 셀룰라 오토마타, 통합시스템, 동적 공간 모델링

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

셀룰라 오토마타(Cellular Automata, CA)는 복잡계(complex system)의 특성을 분석하거나 시뮬레이션 하기 위해 1940년대 말 John von Neuman과 Stanislaw Ulam에 의해 고안된 이론적 체계이다. 그 이후 CA는 물리학, 화학, 생물학, 수학, 컴퓨터 공학 등을 포함한 여러 자연과학 및 공학 분야에서 다양한 동적 현상들을 연구하는데 사용되어 왔다.

지리학 분야에서는 Tobler에 의해 CA의 개념과 원리가 소개되면서(Tobler, 1979) CA는 공간 현상을 모델링 하는 새로운 이론적 체계이자 기법으로 활용되어 왔다. 1980년대 후반부터는 CA가 가지고 있는 시공간 모델링의 개념적 우수성을 바탕으로 토지이용변화 예측모델(White and Engelen, 1994), 도시성장 예측 모델(Batty and Xie, 1994; Kirtland et. al., 1994), 식생 변화모델(Green et. al., 1985; Silvertown et. al., 1992) 등의 연구결과가 발표되고 있

다. 이와 아울러 CA와 래스터 GIS의 개념적 유사성에 착안한 연구자들은 현재 GIS에서 미약한 동적 모델링(dynamic spatial modeling) 혹은 시뮬레이션 기능을 두 시스템의 통합에 의해 보완할 수 있음을 논의하였다(Itami, 1988; Wagner, 1997).

최근 GIS 분야에서는 CA와 GIS를 이용한 도시성장 예측 모델 개발과 적용(Clarke and Gaydos 1998), 시나리오에 입각한 도시경계의 성장예측(Wu, 2000), 지속 가능한 도시발전(Li and Yeh, 2000), Fuzzy logic과 CA의 결합(Wu, 1998a), 토지이용변화 예측(Agarwal et. al, 2000), AHP(Analytical Hierachy Process) 접근법을 적용한 연구(Wu, 1998b) 등 다양한 연구결과가 발표되고 있다. 그러나 현재까지 발표된 연구 결과들에서 CA 모델은 범용의 프로그래밍 언어 혹은 GIS가 가지고 있는 매크로 언어에 의해 작성되어 CA와 GIS가 가지고 있는 장점들(CA의 모델작성의 편리성과 효율성, 개념적 우수성, 최적화된 모델링 성능과 GIS의 공간 데이터의 입력, 저장, 관리, 처리 등의 장점)을 최대한 활용하고 있지 못한 실정이다.

CA와 GIS의 통합에 대한 논의는 (Itami,

1988; Wagner, 1997) 등에서 찾아 볼 수 있으며, 본인의 선행연구(Park and Wagner, 1997)에서는 CA와 GIS의 통합을 위한 이론적인 방법론과 가능성을 제시한 바 있다. 그러나 현재까지 보편화된 컴퓨팅 환경에서 CA와 GIS를 통합하여 실제적인 목적에서 다양한 공간현상을 모델링 할 수 있는 범용의 시스템이 개발되어 있지 않다.

본 연구는 CA를 GIS의 모델링 엔진으로 결합하여 범용의 동적 공간 모델링 혹은 시뮬레이션을 수행할 수 있는 통합시스템을 개발하는데 일차적인 목적을 두고 있으며, 개발된 CA-GIS 통합시스템의 성능을 실험에 의해 분석하고 그 우수성을 평가하는데 부차적인 목적이 있다.

2. CA의 원리와 특성 및 동적 공간 모델링

2.1 CA의 정의와 구성요소

CA는 이산적인 시공간(discrete time and space)에 기반한 비 선형 동적 모델 혹은 시스템으로 정의되며(Gutowitz, 1991), 셀룰라 공간(cellular space), 지역상태(local state), 주변셀(neighborhood), 변화규칙(transition rule)의 4가지 구성요소를 포함하고 있다. 셀룰라 공간은 CA의 기본 단위인 동일한 크기의 셀(cell)에 의해 구성되는 무한한 크기의 다차원 공간을 의미하며, 셀은 주로 삼각형, 사각형, 육각형의 형태를 띠고 있다. 지역상태는 매시각 셀의 상태를 나타내는데 구체적으로는

셀이 가지는 값(주로 숫자로 표현)이다. 주변셀은 중심셀(focus cell) 주위에 인접하고 있는 셀들의 집합을 말하는데 보통 거리, 방향 혹은 각도에 의해 결정된다. 변화규칙은 각각의 셀이 시기별로 어떻게 변화할 지를 규정하는데 여기에는 주변셀들의 구성과 위치가 정의되어 있다. 변화규칙은 모든 셀에 동일하게 적용되는 공통규칙(universal rule)으로 지역적인 특성을 지니고 있으며 CA에서 가장 중요한 요소이다.

2.2 CA의 기본원리

CA의 기본 단위는 개개의 셀이며, 셀의 상태는 매시간 모든 셀에 공통적으로 적용되는 변화규칙에 따라 결정된다. 즉 셀의 상태는 일정한 거리나 방향에 의해 구성되는 지역적인 주변셀들의 상태에 의해서 변화하는데, 이러한 주변셀들의 상태에 대한 정의는 변화규칙에 명시된다. 매시간 개개의 셀 상태(지역상태)는 공통적이고 지역적인 변화규칙에 의해 새로운 상태로 변화하게 되고, 이 상태는 다시 그 다음 번 단계의 초기상태로 입력된다. 따라서 CA는 변화규칙을 반복적으로 적용함으로써 개개의 셀이 변화해 나가는 과정을 살펴볼 수 있도록 해준다.

2.3 CA의 특성

CA는 특성상 반복적인 연산에 의한 변화양상을 시뮬레이션 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 국지적인 프로세스(process)

는 잘 알려져 있으나 전체 시스템의 행태 (behavior)가 알려져 있지 않은 다양한 시스템의 특성을 파악하는데 CA의 기법들이 널리 활용되어 온 것도 바로 이러한 독립적인 셀 들의 매 시기별 변화양상을 시물레이션 할 수 있는 장점 때문이다. 따라서 CA는 무질서 시스템(chaotic system)과 인공생명(artificial life)을 연구하는데 있어 주요한 수단으로 간주되고 있으며 동적이고 복잡한 자연 현상들을 시물레이션 하는데 유용한 도구로 사용되어 왔다.

2.4 CA와 GIS의 유사점 및 차이점

CA의 첫 번째 구성요소인 셀룰라 공간의 2차원 모델은 래스터 GIS의 레이어와 일치하며 두 번째 구성요소인 지역상태는 래스터 GIS의 셀 값과 개념적으로 일치한다. 그러나 래스터 GIS가 바이트, 정수 및 실수형의 데이터를 모두 다룰 수 있는 반면에 CA는 이산구조에 기초하는 관계로 데이터형이 바이트나 정수형에 국한된다. 세 번째 구성요소인 주변셀은 영상처리나 GIS에 사용되는 공간필터(spatial filter)의 마스크나 윈도우(moving window)와 개념적으로 매우 유사하다.

2.5 CA와 동적 공간 모델링

동적 공간 모델링(dynamic spatial modeling)은 시공간상에서 반복적으로 모델을 실행하여 그 결과를 얻는 일련의 기법으로, 특히 어떤 특정한 시기에 모델의 입력 데이터 혹은 파라미터는 이전 시기의 동일

한 모델에 의해 생성된 결과를 사용하는 구조로 이루어져 있으며 모델링의 결과는 초기에 주어진 조건과 시기별 연산결과에 따라 달라질 수 있는 특징을 가지고 있다. 이러한 동적 공간 모델의 주요한 특성과 요구사항이 반복적인 연산에 대한 효과적인 처리와 시공간 현상에 대한 명시적인 정의 및 처리방법이다.

기존의 GIS는 동적 공간 모델링을 위한 요구사항들을 효율적으로 제공하고 있지 못하고 있다. 구체적으로 우선 GIS의 연산들은(래스터 GIS의 연산들) 정적인 연산(static operations)들이 대부분이어서 반복적인 연산의 효과적인 처리를 위한 방법이 제공되지 않으며 그 성능 자체도 상당히 떨어진다. 기본적으로 기존의 GIS에서 반복적인 연산을 처리하기 위해서는 제공되는 매크로 언어나 커스터마이징 언어(예를들면 VBA)를 이용하여 연산을 계속 반복하는 방법을 취할 수 있지만 실행 성능은 데이터의 크기와 수행되는 연산의 수 및 복잡성에 따라 기하급수적으로 떨어진다(Park, 1996)

그리고 기존의 GIS는 주로 공간적 현상에 대한 명확하고 구체적인 연산방법을 제시하고 있지만 시간적 차원에 대한 명확한 정의와 연산방법은 아직까지도 확립되어 있지 않다. 따라서 동적 공간 모델링에서 요구되는 시공간 현상에 대한 명시적인 정의와 처리방법이 기존의 GIS에서는 아직까지 미흡한 실정이다.

CA는 위에서 지적한 동적 공간 모델링을 위한 기본적인 요구사항을 지원해 줄 수 있으며 이는 기존의 GIS와의 통합에 의해서 가능하다(Park and Wagner 1997).

CA는 특성상 다차원의 시공간 현상에 대한 명시적인 모델을 작성하고 수행할 수 있으며 특수한 하드웨어나 병렬처리 컴퓨터와의 연계 및 반복적인 연산을 고려한 소프트웨어의 설계 등으로 연산 성능이 매우 우수하다. 따라서 CA와 GIS를 긴밀히 연계하여 통합시스템으로 구현하게 되면 기존의 GIS에서 미약한 동적 공간 모델링 기능을 획기적으로 향상할 수 있으며 다양한 모델링이나 시뮬레이션에 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

이와 아울러 CA-GIS 통합시스템은 단순히 기존 GIS의 동적 공간 모델링의 기능을 보완하고 수행성능을 향상하는 것뿐만 아니라(박수홍, 1997) 기존의 GIS에서는 불가능했던 여러 가지 공간 연산 즉, 시공간 필터링(spatio-temporal filters), 시간 종속 공간필터(time-dependent spatial filter), 다차원 공간필터(multi-dimensional spatial filtering) 등의 구현을 가능하게 해 준다(Park, 1996). 또한 CA-GIS 통합시스템은 도시성장 예측모델, 산불확산 모델 및 기타 공간 확산모델 등을 포함한 다양한 동적 공간 모델을 보다 효과적으로 구현하고 실행할 수 있는 환경을 제공한다(Park, 1997).

3. CA-GIS 통합시스템의 설계

3.1 통합시스템 설계의 기본방향

CA-GIS 통합시스템은 보편화된 데스크탑 컴퓨팅 환경(Windows를 운영체제로 사용하는 PC환경)에서 CA 소프트웨어, 구

체적으로는 CA simulator와 래스터 GIS 소프트웨어를 결합하여 도시성장 예측 모델링과 같이 CA와 GIS를 모두 사용하는 동적 공간 모델을 수행할 수 있도록 설계되었다. 실제적인 모델링 시스템으로 활용되기 위해 통합시스템은 대용량의 데이터를 효과적으로 처리할 수 있고 GIS와 CA 간의 데이터 변환이 손쉽게 이루어지며 CA 모델을 작성, 수행하고 시뮬레이션 결과를 출력하는데 필요로 하는 일련의 프로그램들을 제공하도록 설계되었다. 또한 통합시스템은 사용자가 단일한 사용자 인터페이스를 통해 CA와 GIS의 기능을 모두 사용할 수 있도록 구성되었다.

3.2 CA simulator와 래스터 GIS의 선정

1) CA simulator의 선정

CA simulator는 CA 모델을 작성하고 실행하는데 사용되는 소프트웨어이다. 현재까지 개발되어 있는 CA simulator는 주로 UNIX와 Windows환경에서 사용 가능하며 대표적인 것에는 Cellular Automata System, CAM, CAOS, CASIM, CAPOW98, CDL, CAT/ CARP, DDLAB, FLEXICA, LCAU, CELLSPRINGS, CAFUN, CELLLAB, SARCASIM, MCELL, CAMEL/CARPET 등이 있다.

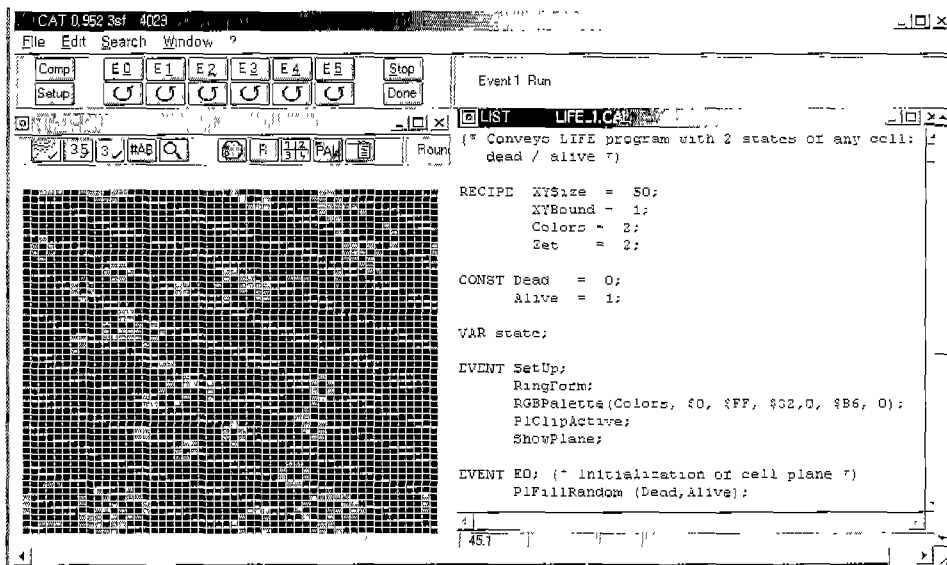
통합시스템에서 GIS와 연결되어 사용될 CA simulator의 선정을 위해 아래의 기준을 본인의 선행연구(Park and Wagner, 1997)를 기초로 해서 정립하였고 이를 적용하여 최적의 CA simulator를 선정하였다.

- UNIX 체제에서만 수행되는 CA simulator는 제외한다.

- CA simulator는 open system 형태(예를 들면 public domain 소프트웨어이며 source code가 모두 공개되어 있는 시스템)가 바람직하며, 셀의 상태 수, 주변셀의 모양 및 크기, 셀들라 공간의 크기 및 차원(dimension)에 제한이 없어야 한다. 이는 CA 모델을 작성할 때 최대한의 편의성을 제공하고 상대적으로 대용량인 GIS 데이터를 CA에서 효과적으로 처리할 수 있어야 하기 때문이다.
- CA simulator는 보다 실질적인 모델링 기능을 수행할 수 있어야 하며, 프로그래밍 언어의 형태로 제공되어야 한다.
- 마지막으로 CA simulator 소프트웨어는 통합에 편리하도록 모듈화 되어있어야 하고 각각의 기능이 독립적으로 GIS와 쉽게 연결될 수 있어야 한다.

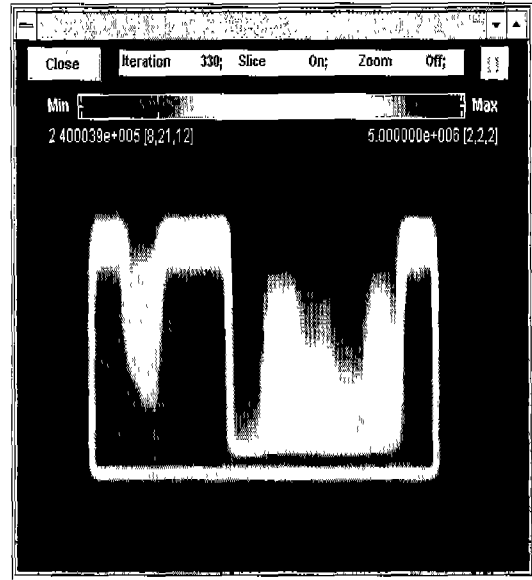
Windows 환경에서 사용 가능한 CA simulator에는 CAT, CELLAB, MCELL300, SARCASIM, CAMEL/CARPET, CAPOW98, Cellular Automata System 등이 있다. CAT(Cellular Automata Tool)는 셀들라 공간의 크기와 주변 셀의 크기에 제한이 없고, CARP(Cellular Automaton Programming Language)라는 모듈화된 프로그램 환경을 제공하며, 사용자 인터페이스나 기능의 수정이 용이하다. 그러나 실행 파일만을 제공하고 모듈화 되어 있지 않으며, 셀의 상태값이 256개로 제한되어 있어 고려대상에서 제외하였다. 마찬가지로 소스코드를 제공하지 않는 CELLAB, MCELL300, SARCASIM 등 도 고려대상에서 제외되었다. 그림 1은 CAT의 실행화면이다.

CAMEL/CARPET는 병렬 마이크로 프로세스(transputers)에 기반한 simulator로 셀들라 공간의 크기와 셀 상태에 제한이 없으

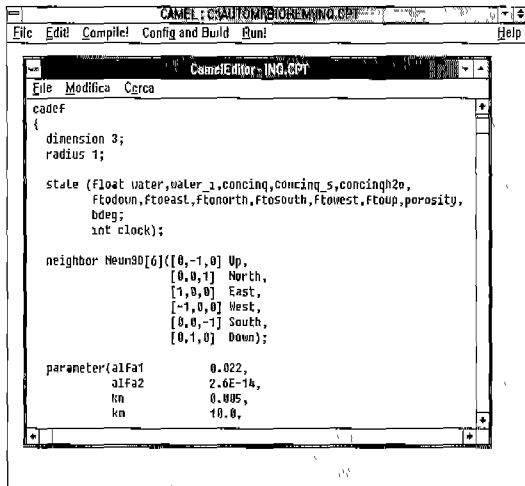


[그림 1] CAT의 실행예

며 CA 모델을 전용의 언어(CARPET)로 작성할 수 있다. 또한 대용량의 데이터를 처리할 수 있고 대부분의 다른 simulator의 데이터 타입이 바이트나 정수형으로 제한되는 반면에 CAMEL은 short, int, float, double의 모든 데이터 타입을 지원한다. 그러나 병렬 컴퓨터를 사용하려면 하드웨어적인 네트워크 구성과 소프트웨어적인 구성을 지정해야하고 각 네트워크에 따른 라우팅 함수를 만들어 줘야 하므로, 이에 대한 고려가 필요하고, 이 소프트웨어는 현재 공개되어 있지 않아 본 연구에서는 제외되었다. 그림 2와 3은 CAMEL/CARPET의 모델 작성 예와 화면 출력결과를 보여주고 있다.



[그림 3] SIMULATION 예



[그림 2] CARPET를 이용한 모델작성의 예

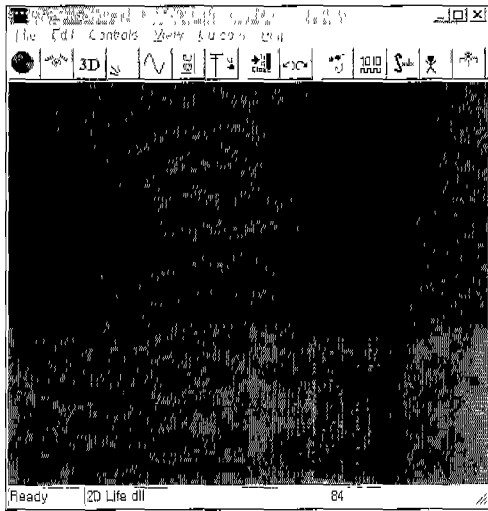
CAPOW98은 연속적인 상태와 이산적인 상태 모두를 사용하는 1·2 차원 CA simulator로, 셀의 상태에 대한 제한이 없고, 정수형과 실수형의 데이터형을 모두 지원한다.

이 소프트웨어는 실행파일과 부분적인 소스만을 제공하고 있으며, 패키지내 모델 작성을 위한 프로그래밍 언어가 포함되지 않아 고려대상에서 제외하였다. 하지만, 셀의 3D 그래픽 표현 등 다양한 기능에 대한 모듈을 부분적으로 제공하고 있고, 대용량의 데이터를 처리할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그림 4는 CAPOW98에서 Game of Life를 수행하고 있는 화면 출력의 예이다.

Cellular Automata System은 CA 프로그래밍 언어인 Cellang, Cellang으로 작성된 모델을 컴파일하는 Cellc, 그리고 CA모델 수행 결과를 보여주는 Avcam 등으로 구성되어 있는 simulator이다. Cellular Automata System은 여러 Unix 환경에서 수행되고 Windows 환경 하에서도 사용이 가능하다. Cellular Automata System은 모듈구조로 되어 있으며, Cellang 이라는 셀룰라 언어를

통해 다양한 CA 모델을 작성할 수 있다. Cellang은 C 또는 PASCAL 프로그래밍 언어와 아주 유사한 문법구조를 갖고 있다. 그림 5는 Cellang으로 작성한 Game of Life의 예이다.

구조 구성되어 있다. 따라서 본 연구에서는 Cellular Automata System을 통합시스템의 CA simulator로 선정하였다. 그림 6은 Cellular Automata System에 의해 수행되는 Game of Life의 실행 예를 나타내고 있다.



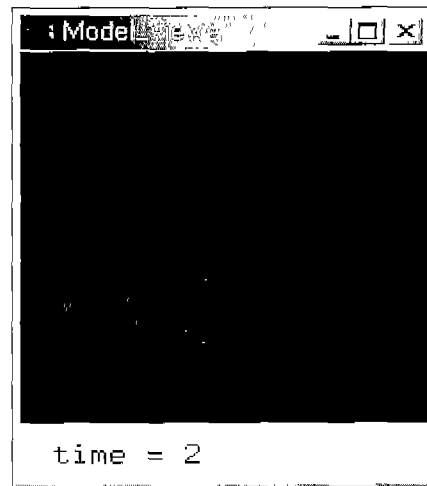
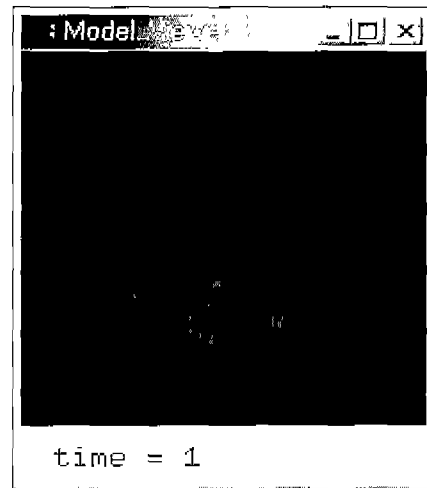
[그림 4] CAPOW98에서 Game of Life 모델을 실행하고 있는 화면출력의 예

```

2 dimensions of 0..1
sum := [0, 1] + [1, 1] + [1, 0] + [-1, 1] + [-1, 0]
      + [-1, -1] + [0, -1] + [1, -1]
cell := 1 when (sum = 2 & cell = 1) | sum = 3
      := 0 otherwise
    
```

[그림 5] Cellang으로 작성된 Game of Life

Cellular Automata System은 셀룰라 공간의 크기와 차원, 셀 상태의 수, 주변셀의 크기에 대한 제약이 없고 모든 소스 코드가 공개되어 있으며, 통합에 유리한 모듈



[그림 6] Cellular Automata System의 Game of Life 실행 예

2) 래스터 GIS의 선정

CA-GIS 통합시스템에서 사용될 래스터 GIS는 CA simulator와 마찬가지로 Windows 환경에서 실행이 가능하고 풍부한 연산기능을 갖추고 있으며 새로운 기능의 추가와 커스터마이징(customizing)이 편리한 상용 소프트웨어를 선정하고자 하였다. 이러한 기준에 적합한 래스터 GIS 소프트웨어로는 ArcGRID, IDRISI32, GRASS를 들 수 있다.

CA-GIS 통합시스템을 위한 GIS 소프트웨어로 ArcGRID와 IDRISI32를 선택하였으며 GRASS는 현재 Windows용 버전이 완전히 개발되어 있지 않아 제외하였다. 본 연구에서 ArcGRID와 IDRISI32를 모두 선정한 이유는 두 시스템이 통합시스템을 위한 기본적인 요건을 모두 충족하고 있으며, 본 연구에서 제시하는 방법론이 특정한 시스템에 국한되지 않는 일반적인 방법임을 증명하기 위해서이다.

3.3 통합시스템 구축을 위한 Coupling 방법

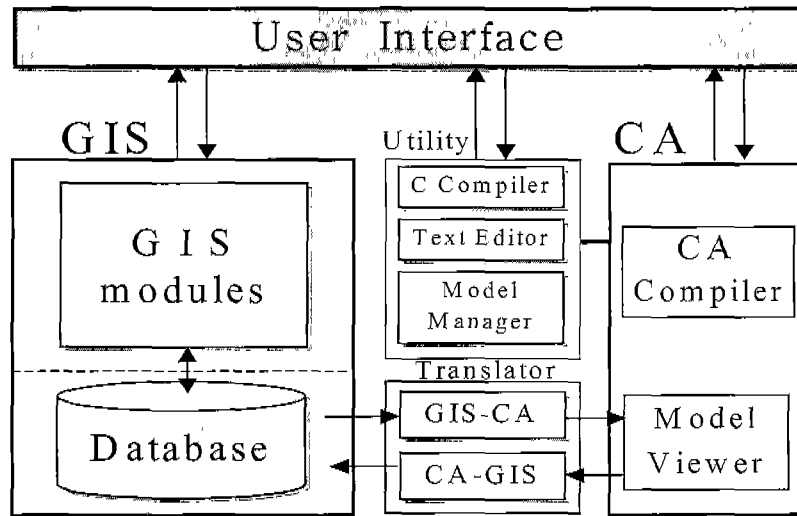
일반적으로 GIS와 타 시스템을 통합하기 위해 loose coupling, close coupling, full integration의 세 가지 방법을 취할 수 있다(Nyerges, 1992). Loose coupling에서는 두 시스템이 독립적으로 운용되어 각각의 시스템을 수행하기 위해서는 원래 각 시스템이 가지고 있는 사용자 인터페이스를 사용해야 하며 두 시스템이 중간에 자료변환기를 통해 데이터를 서로 공유한다. Close coupling에서는 두 시스템이 하나의 사용자 인터페이스에 의해 구

동되며 데이터의 공유는 공통적인 데이터 포맷에 의해 이루어지므로 loose coupling 보다 결합도가 높은 방법이다. Full integration은 특정한 시스템에서 통합될 다른 시스템의 기능을 모두 새로 구현하여 통합하는 방식으로 결합도가 가장 높은 방법이다. 그러나 Full integration은 새로 모든 프로그램을 작성해야 하기 때문에 많은 시간과 비용이 요구된다.

본 연구에서는 이 세 가지 방법 중에서 close coupling 방식을 택하였다. 이 방식은 loose coupling에 비해 결합도가 높고 상대적으로 full integration에 비해 경제적이며 GIS와 다른 소프트웨어의 통합에 가장 널리 쓰이는 방법이다.

3.4 통합시스템의 구조와 구성요소

CA-GIS 통합시스템은 래스터 GIS, CA simulator, GIS 데이터베이스, 사용자 인터페이스, Two-way data translator, CA 모델 작성을 위한 utility 등으로 구성된다. 전체 시스템의 구조는 그림 7과 같다. 통합 시스템에서는 래스터 GIS의 사용자 인터페이스를 통해 시스템의 모든 기능을 수행할 수 있으며 래스터 GIS와 CA simulator에서 사용될 데이터는 GIS데이터베이스에 저장되고 관리된다. CA와 GIS 간의 데이터 변환은 data translator에 의해 이루어지며, 양방향 변환이 가능하다. 또한 CA simulator가 기본적으로 제공하는 CA compiler, model viewer 이외에 모델을 작성을 위한 텍스트 에디터, CA 모델 관리자(model manager), C compiler 등



[그림 7] CA-GIS 통합시스템의 구조

을 utility로 포함시켰다. CA 모델링은 GIS 데이터를 data translator를 통해 변환한 다음 model viewer에서 변환된 데이터와 컴파일된 모델을 실행하여 이루어지며 결과는 다시 GIS 데이터로 변환되어 GIS 데이터베이스 저장된다. 모델링의 결과는 필요에 따라 GIS에 의해 분석될 수 있고 출력될 수 있다.

4. CA-GIS 통합시스템의 구현

4.1 통합시스템의 개발환경

CA-GIS 통합시스템은 Intel Pentium III-733 Mhz CPU와 320Mbyte 메모리, 기본 해상도 1024x768을 지원하는 그래픽 카드가 탑재된 PC에서 구현되었으며 운영체제로는 Windows 2000을 사용하였다. 프로그램의 개발은 Visual Basic 6.0을 사

용하였으며, Cellular Automata System을 Windows에서 사용하기 위해 UNIX용 소프트웨어를 Windows에서 컴파일하고 실행 파일로 만들어주는 Cygwin을 이용하였다.

4.2 통합시스템의 구성요소 개발 및 구현

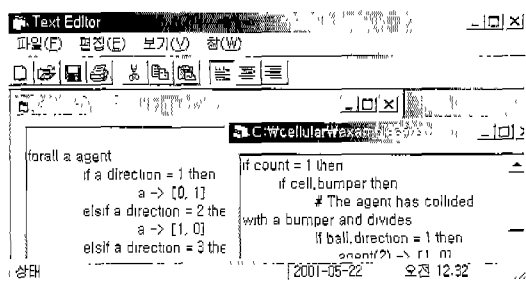
본 연구에서는 CA-GIS 통합시스템을 ArcGRID와 IDRISI32 그리고 Cellular Automata System을 사용하여 두 개의 통합시스템(CA-ArcGRID와 CA-IDIRISI32)으로 개발하였다. CA simulator로 사용한 Cellular Automata System은 원래 UNIX에서 개발된 소프트웨어이므로 이를 Windows용 소프트웨어로 변환하였으며 변환된 프로그램들을 다시 Visual Basic을 사용하여 재구성하였다.

1) 통합시스템의 구성요소 개발

통합시스템의 구성요소 중에서 Text editor 와 CA model manager 그리고 CA와 GIS 간의 data translators는 Windows환경에서 새로 개발되었다. 기존의 Cellular Automata System에서 제공하는 CA compiler, filter program, model viewer와 c-compiler 등은 Cygwin을 사용하여 Windows 환경에서 컴파일되고 Visual Basic 6 을 사용하여 그래픽 유저 인터페이스를 갖는 프로그램들로 재구성되었으며 각 구성요소의 기능들은 통합시스템의 목적에 맞도록 수정되어 구현되었다.

가) Text Editor

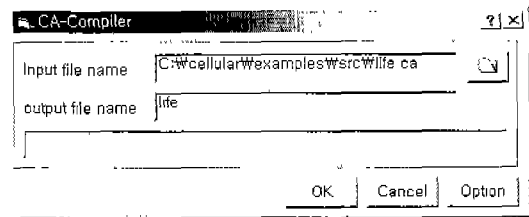
Text editor는 범용의 텍스트 편집 도구로 다중 문서환경을 지원하며 주로 CA 모델과 C 코드의 작성, 편집을 목적으로 제작된 모듈이다(그림 8).



[그림 8] Text Editor

나) CA-Compiler

CA-Compiler는 텍스트 에디터에서 Cellang 으로 작성한 CA 모델을 컴파일 하는 도구이다. Cellang으로 기술된 모델은 내부적으로 C 코드로 변환되고 C 컴파일러를 이용하여 실행파일의 형태로 만들어진다.

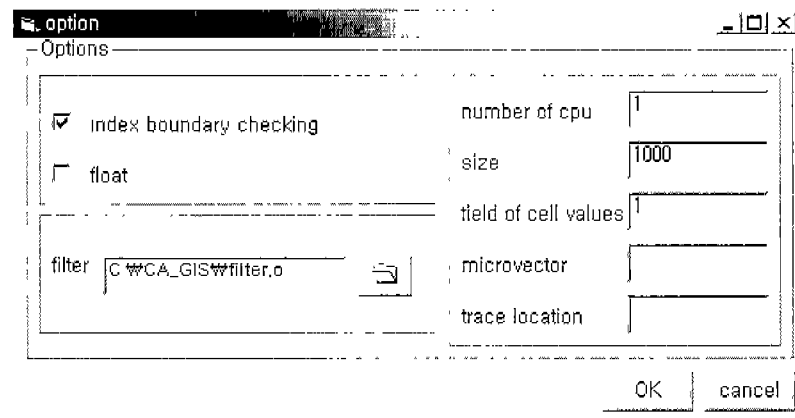


[그림 9] CA-Compiler의 화면

그림 10은 Compile 옵션을 지정하는 대화창으로 number of cpu는 다중 프로세서를 사용하는 경우에 그 개수를 지정하는데 기본값은 1 이다. Size 옵션은 화면에 출력될 모델의 픽셀 사이즈를 정의하며 field of cell values는 데이터에 다수의 필드가 있는 경우 사용자가 원하는 필드만을 시뮬레이션 하는 모델을 만드는데 사용된다. Microvector 옵션은 데이터를 bit별로 압축하여 모델을 실행하며 최대 5배까지 실행속도를 향상할 수 있다. Filter 옵션은 object 파일의 형태로 작성된 필터 프로그램을 모델에 포함하여 컴파일 하는데 사용된다.

다) Filter program

필터 프로그램은 CA 모델 실행시에 사용자가 필요한 정보를 효과적으로 생성할 수 있는 방법을 제공한다. 필터 프로그램은 C 코드로 작성된 오브젝트 파일 형태이며 이는 CA 모델이 컴파일 될 때 함께 링크된다. 필터 프로그램은 CA 모델을 실행할 때 기본적으로 제공되지 않는 시계열 셀의 통계량 및 값을 추출하는데 매우 유용한 도구이다.



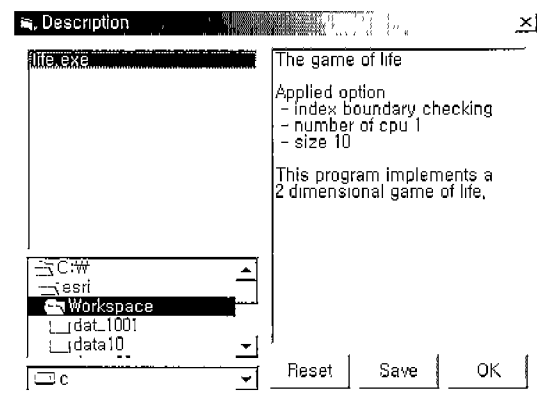
[그림 10] CA-Compiler의 옵션

라) C-Compiler

C 언어의 컴파일러로 필터 프로그램의 제작을 위해서 필요한 모듈이며 Cygwin의 GCC를 이용한다(그림 11).



[그림 11] C Compiler



[그림 12] Model Manager의 실행에

마) CA-Model Manager

CA-Model Manager는 CA-Compiler에서 작성한 모델에 대한 설명을 작성하고 관리하는 모듈이다. 모델의 이름을 통해서 얻을 수 있는 정보는 상당히 제한적이기 때문에 CA 모델의 컴파일 시 적용한 옵션에 관한 정보, 모델에 적용된 연산, 의미 등, 관련정보가 필요하다. 실행파일 형태로 작성된 CA 모델을 선택하면 관련된 설명을 볼 수가 있다(그림 12).

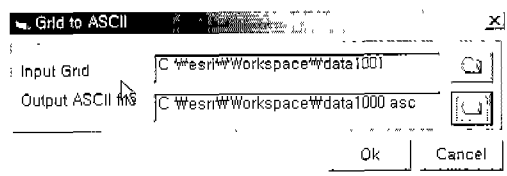
바) Data Translators

Data translator는 CA 시뮬레이터에서 사용되는 데이터와 GIS 소프트웨어에서 사용되는 래스터 데이터간의 변환을 위한 모듈이다. CA simulator에서 사용되는 데이터는 텍스트 형태의 데이터로 이를 GIS 데이터 포맷으로 변환해야 하며 또한 사용되는 래스터 GIS 마다 각기 따로 개발해야 한다.

ArcGRID용 Data Translator는 CA simulator

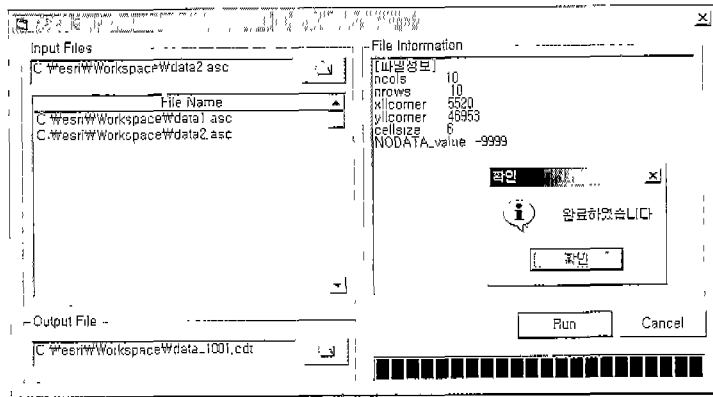
에서 사용되는 데이터와 ArcGRID에서 사용되는 데이터간의 변환을 위해 작성된 모듈이다. 그러나 ArcGRID 데이터의 포맷이 공개되어 있지 않아 직접적인 변환은 불가능하므로 ASCII 형태의 중간포맷을 거쳐 변환한다. 양방향의 변환을 위해 본 연구에서는 4개의 변환기를 개발하였다. 그림 13은 ArcGRID

데이터를 중간교환 포맷인 ASCII 데이터로 변환하는 모듈이다. ArcInfo의 GRIDASCII 명령어를 사용하여 수행할 수 있도록 ESRI Arc automation server에서 Arc class의 Command 멤버함수를 사용하였고, Grid data의 선택을 위해 ArcCatalog의 GxDialog CoClass와 IGxDialog interface를 사용하여 구현하였다.



[그림 13] Grid to ASCII 변환모듈

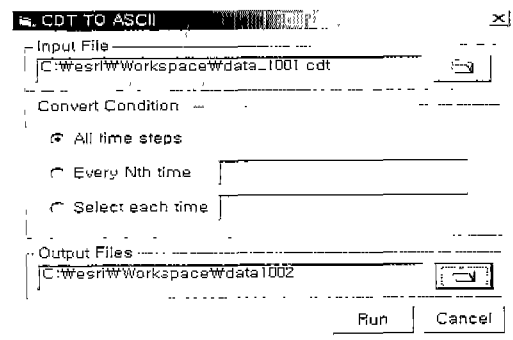
그림 14는 ASCII 데이터를 CA 데이터 형태로 변환하는 모듈이다. 최대 20개의 20개의 필드를 가진 CA 데이터를 만들 수 있다. 데이터의 자유로운 추가 및 삭제가 가능하고 추가된 각각의 ASCII 데이터 헤더정보를 볼 수 있다. 변환할 때 각각의 ASCII 데이터에 대한 정보는 임시파일을 만들어 저장한다. 이 파일은 CA 데



[그림 14] ASCII to CA 변환모듈

이터를 다시 ASCII 데이터로 만들 때 사용된다.

그림 15는 CA 데이터를 중간교환 포맷인 ASCII 데이터로 변환하는 모듈이다. All time steps 옵션을 선택하면 전체 time step에 대한 데이터를 ASCII 데이터로 변환을 한다. Every Nth time 옵션을 선택하면 설정한 시간의 배수에 해당하는 데이터만을 ASCII 데이터로 변환을 한다. Select each time 옵션을 선택하면 사용자가 입력한 임의의 시간에 해당하는 데이터가 ASCII 데이터로 변환된다.

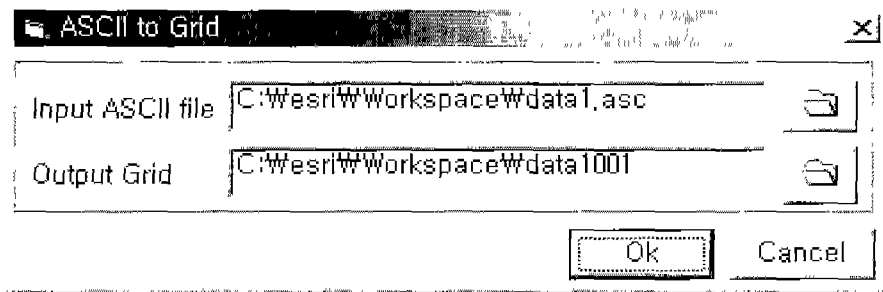


[그림 15] CA to ASCII 변환모듈

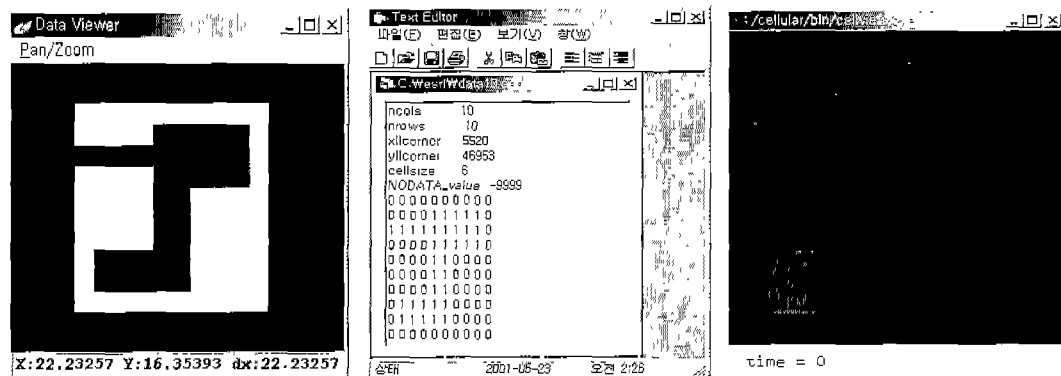
그림 16은 ASCII 데이터를 ArcGRID 데이터로 변환하는 모듈이다. ArcInfo의 ASCIIGRID 명령어를 사용하여 수행할 수 있도록 ESRI Arc automation server에서 Arc class의 Command 멤버함수를 사용하였고, Grid data의 선택을 위해 ArcCatalog의 GxDialog CoClass와 IGxDialog interface를 사용하여 구현하였다. 아래의 그림 17은 ArcGRID의 데이터를 변환기를 사용하여 CA 데이터로 변환한 결과를 보여주고 있다. 사용된 데이터는 10 x 10의 가상적인 데이터이다.

IDRISI32용 Data translator는 모두 2개가

개발되었다. IDRISI32의 데이터 포맷은 공개되어 있어 ArcGRID와는 달리 CA 데이터에서 IDRISI32 데이터로 IDRISI32 데이터에서 CA 데이터로의 직접변환이 가능하다. 그림 18은 IDRISI32의 래스터 레이어를 CA 데이터를 변환하는 모듈이다. 기본적인 기능은 ArcGRID용 변환기와 동일하다. 최대 20개의 래스터 레이어를 한꺼번에 변환하여 하나의 CA용 데이터를 만들 수 있다. 그림 19와 그림 20은 IDRISI32 데이터를 CA로 변환한 결과를 보여주고 있다.

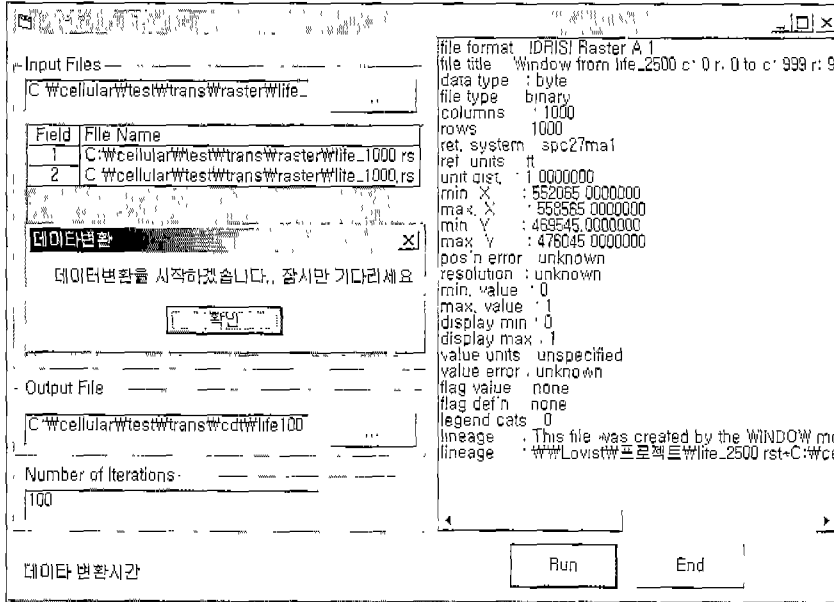


[그림 16] ASCII to Grid 변환모듈

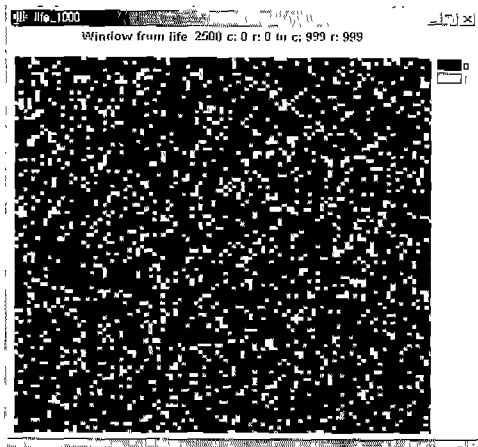


[그림 17] ArcGRID와 CA simulator사이의 데이터 변환 예(왼쪽: ArcGRID, 중간: ASCII data, 오른쪽: CA)

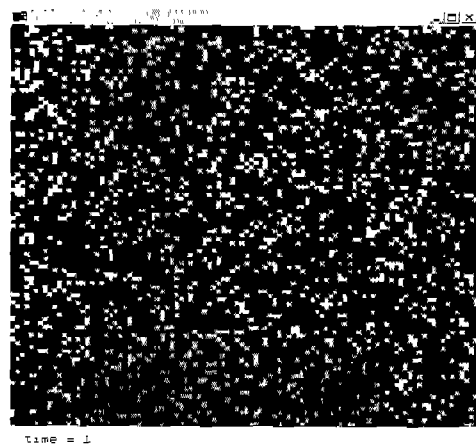
CA-GIS 통합시스템의 설계와 구현



[그림 18] IDRISI32 to CA 변환모듈

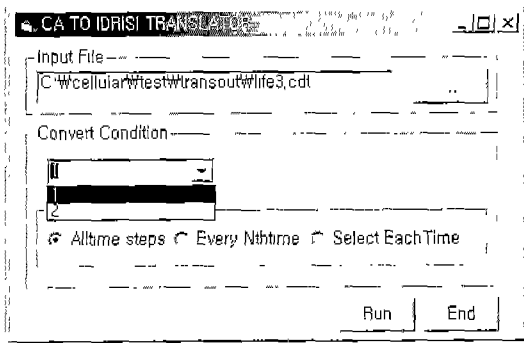


[그림 19] IDRISI32의 레이어



[그림 20] CA 데이터로 변환된 IDRISI32 레이어

그림 21은 CA 데이터를 IDRISI32로 변환하는데 사용되는 모듈이다. 기본적인 기능은 ArcGRID용 변환기와 동일하며 옵션도 동일하다. 그러나 ArcGRID와는 달리 중간단계를 거치지 않고 CA데이터가 바로 GIS 데이터베이스에 저장된다.

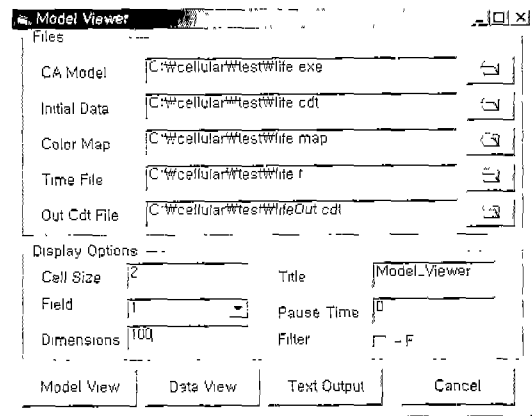


[그림 21] CA to IDRISI 변환모듈

사) Model Viewer

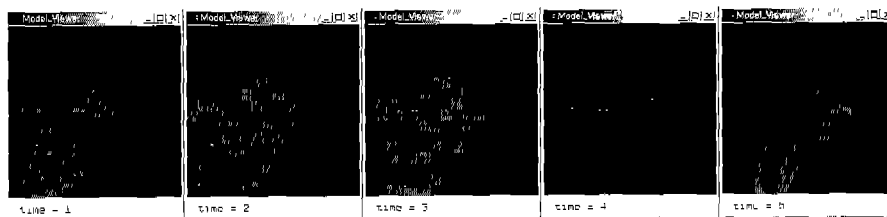
Model viewer는 CA 데이터를 화면에 출력하거나 CA 모델과 함께 실행하여 시뮬레이션의 결과를 동적으로 화면상에서 볼 수 있게 하는 기능을 가지고 있다(그림 22). 또한 Model viewer는 시뮬레이션의 결과를 화면에 출력하지 않고 CA 데이터로 저장하는 기능을 가지고 있어 이를 변환기를 이용하여 변환하면 GIS에서 분석할 수 있다.

Model Viewer는 디스플레이 그래픽 하



[그림 22] Model Viewer

드웨어에 독립적인 그래픽 라이브러인 Open Graphic Library를 사용하고 있으며 화면에 출력되는 컬러를 지정하거나 실행 시간을 정의하는 time file의 입력을 가능하게 한다. 또한 화면에 출력되는 속도를 조정할 수도 있으며 filter program의 사용도 가능하다. 원래 Cellular Automata System에서 제공되는 Viewer는 화면의 크기만큼만 출력을 할 수 있게 되어 있으나 본 연구에서는 이를 수정하여 일반적으로 대용량의 데이터를 화면에서 볼 수 있도록 하였다. 그림 24은 Model viewer를 통해서 CA 모델의 결과가 출력되는 예를 보여주고 있다.



[그림 23] Model viewer의 실행의 예

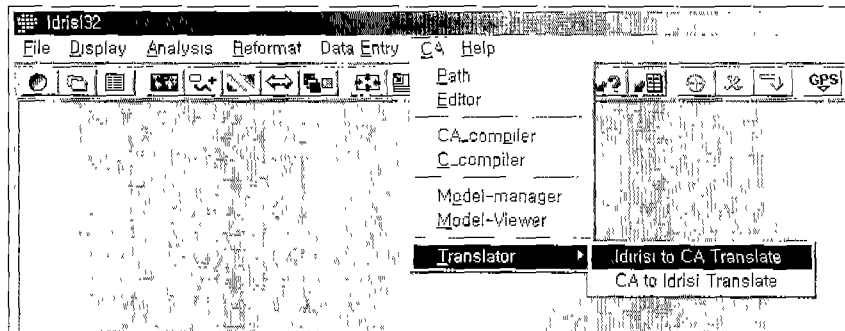
2) CA-IDRISI32 통합 시스템의 사용자 인터페이스

CA-IDRISI32 통합시스템의 사용자 인터페이스는 IDRISI32가 가지고 있는 Full-down 사용자 인터페이스에 새로 개발된 CA 모듈들을 추가하여 구현하였다. 추가된 CA 기능들은 하나의 독립적인 메뉴로 구성되며 여기에 8개의 모듈(경로설정, 텍스트 편집기, CA 컴파일러, C 컴파일러, 모델 관리자, 모델 Viewer, 양방향 자료 변환기)이 포함되어 있다. 사용자는 이 인터페이스를 통해 통합시스템의 모든 기능을

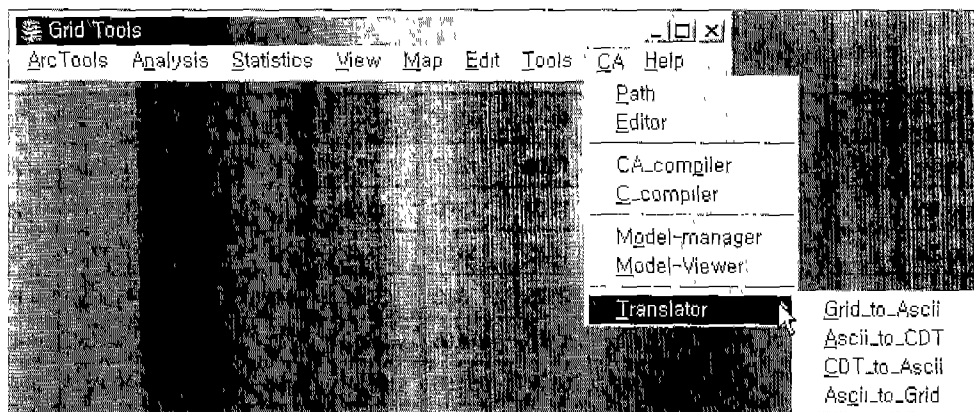
수행할 수 있다(그림 24).

3) CA-ArcGRID 통합 시스템의 사용자 인터페이스

CA-ArcGRID 통합시스템의 사용자 인터페이스는 ArcInfo의 기존 메뉴시스템(AML로 작성되어 있음)에 CA 기능을 추가하여 구현하였으며 IDRISI32의 경우와 같이 사용자는 이 인터페이스를 통해 통합시스템의 모든 기능을 사용자 인터페이스를 통해 사용자는 ArcGRID의 기능과 CA의 기능을 모두 이용할 수 있다(그림 25).



[그림24] CA-IDRISI32의 사용자 인터페이스



[그림 25] CA-ArcGRID의 사용자 인터페이스

5. CA-GIS 통합시스템의 성능분석

CA-GIS 통합시스템이 가지는 모델 실행 성능을 측정하기 위해 하나의 예제 모델(Game of Life 모델)을 통합시스템과 기존의 GIS에서 각각 구현하여 그 실행시간을 비교하였다. 성능분석에서는 본 연구에서 개발된 CA-GIS 통합시스템의 동적 모델 실행 성능이 기존의 GIS에 비해 어떠한 차이를 보이는지를 평가하고자 하였다. 물론 Game of Life 모델은 도시성장

예측 모델이나 토지이용변화 모델과는 달리 비교적 간단하여 통합시스템의 성능을 포괄적으로 나타낼 수는 없지만 통합시스템의 성능을 추정해 볼 수 있는 간접적인 방법으로 판단된다.

구체적으로 성능분석에서는 Game of Life 모델을 각각 통합시스템, IDRISI32 그리고 ArcGRID에서 구현하고 다양한 크기의 가상적인 데이터(64 x 64에서부터 4096 x 4096까지)를 사용하여 반복횟수별(최고 100번 반복) 실행시간을 측정하였다. 본 연구에서 개발된 두 개의 통합시

<표 1> CA-GIS 통합시스템의 Game of Life 모델 수행시간 (단위: 초)

Size \ 횟수	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
64 x 64	0.2	0.21	0.22	0.23	0.24	0.24	0.25	0.26	0.27	0.27
128 x 128	0.26	0.3	0.32	0.34	0.37	0.42	0.44	0.46	0.48	0.49
256 x 256	0.5	0.64	0.75	0.87	0.97	1.07	1.18	1.27	1.37	1.46
512 x 512	1.44	1.94	2.41	2.84	3.23	3.63	4.02	4.4	4.78	5.15
1024 x 1024	5.26	7.22	9.01	10.71	12.33	13.9	15.43	16.93	18.4	19.84
2048 x 2048	21.72	29.38	36.66	43.45	49.6	56.15	62.12	68.05	73.96	79.78
4096 x 4096	137.27	145.46	166.37	189.59	215.93	241.96	284.76	297.7	395.71	419.96

<표 2> IDRISI32의 Game of Life 모델 수행시간 (단위: 초)

Size \ 횟수	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
64 x 64	2.5	5	7.52	10.09	12.77	15.4	17.6	20.21	22.98	25.39
128 x 128	2.79	5.51	8.29	11.07	13.09	16.76	19.6	22.49	25.69	28.31
256 x 256	3.6	7.19	10.74	14.35	18.01	21.42	25.04	28.65	32.51	36.02
512 x 512	6.21	12.45	18.52	25.23	32.3	37.66	44.66	50.43	56.57	64.38
1024 x 1024	41.4	81.98	136.87	178.8	214.05	266.2	312.2	356.55	403.55	426.6
2048 x 2048	166.81	370.65	560.68	756.77	967.56	1196.78	1440.99	1687.8	1999.02	2176.64
4096 x 4096	226.92	429.77	1461.57	1981.16	2484.97	2505.58	2954.1	3375.36	3706.15	4511.66

시스템은 모두 동일한 하드웨어와 CA simulator 를 사용하므로 성능의 차이가 없을 것으로 판단되어 CA-GIS 성능분석은 CA-IDRISI32 통합시스템만을 대상으로 실시되었다.

터 크기가 4096 x 4096의 경우에도 모델을 100회 반복수행 하는데 약 7분 정도 (420초)만이 소요됨을 알 수 있다.

5.1 CA-GIS 통합시스템의 성능분석

CA-GIS 통합시스템의 성능분석을 위해서 CA-IDRISI32 통합시스템의 CA simulator 를 사용하여 Game of Life 모델을 구현하고 데이터의 크기를 64 x 64에서부터 4096 x 4096까지 증가시키면서 최대 100 번까지 반복적으로 모델 실행하였다. 데이터의 크기별, 반복횟수별 모델 실행에 소요된 시간(3회 측정치 평균)은 표 1과 같다.

결과를 살펴보면 데이터의 크기가 증가할수록 그리고 반복횟수가 증가할수록 소요시간이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 동일한 데이터 크기내에서 반복 횟수가 증가하더라도 소요시간의 증가가 상대적으로 작음을 알 수 있다. 데이

5.2 IDRISI32의 성능분석

CA-GIS 통합시스템의 성능분석에 사용된 동일한 데이터를 적용하여 IDRISI32의 동적 모델링 성능을 분석하였다. CA-GIS 통합시스템과 마찬가지로 Game of Life 모델을 IDRISI32에서 구현하고 데이터의 크기를 64 x 64에서 4096 x 4096까지 증가시키면서 반복횟수별 모델 실행시간을 측정하였다(3회 측정 평균치)(표 2).

전반적으로 IDRISI32의 수행시간이 CA-GIS 통합시스템에 비해 상대적으로 많음을 알 수 있으며, 특히 데이터의 크기가 1024 x 1024를 초과하는 경우 반복횟수가 증가할수록 실행시간이 급격히 증가함을 알 수 있다. 데이터의 크기가 4096 x 4096이고 반복횟수가 100회인 경우 약 75분 정도가 소요되어 CA-GIS 통합시스템에 비해 10

<표 3> ArcGRID의 Game of Life 모델 수행시간 (단위: 초)

Size \ 횟수	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
64 x 64	9.86	20.26	32.89	45.34	60.56	77.67	93.23	114.37	131.76	151.39
128 x 128	10.32	21.87	33.73	47.77	63.18	78.17	97.21	115.12	134.21	152.29
256 x 256	11.28	23.42	36.41	50.33	66.54	83.20	101.17	124.26	143.15	163.40
512 x 512	15.27	31.09	48.32	68.30	88.11	110.17	131.39	155.93	179.10	206.67
1024 x 1024	48.91	95.00	138.88	188.09	233.40	276.68	321.98	365.58	413.59	458.92
2048 x 2048	146.12	256.93	358.90	445.98	544.59	640.10	760.29	859.61	980.16	1088.26
4096 x 4096	439.18	781.84	1107.78	1457.24	1777.35	2036.45	2364.85	2717.45	3028.69	3299.89

배의 차이가 나타남을 알 수 있다.

5.3 ArcGRID의 성능분석

마지막으로 ArcGRID의 동적 모델링 성능을 분석하기 위해 CA-GIS 통합시스템의 성능분석에서 사용되었던 동일한 데이터를 적용하고 Game of Life 모델을 구현하였다. ArcGRID의 성능분석도 위의 두 가지 경우와 마찬가지로 데이터의 크기별 반복횟수별 수행시간을 측정하였으며(3회 측정 평균치) 결과는 표 3과 같다.

ArcGRID의 수행시간이 IDRISI32의 경우와 유사하게 CA-GIS 통합시스템에 비해서 상대적으로 많이 증가함을 알 수 있다. ArcGRID의 경우 IDRISI32의 경우와 같이 데이터의 크기가 1024 x 1024를 초과하는 경우 반복횟수가 증가할 수록 실행시간이 급격히 증가함을 알 수 있다. 데이터의 크기가 4096 x 4096이고 반복횟수가 100회인 경우 약 55분 정도가 소요되어 CA-GIS 통합시스템에 비해 8배의 차이가 나타남을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구는 CA와 GIS를 연결하여 다양한 유형의 동적 공간 모델링 및 시뮬레이션에 사용될 수 있는 통합시스템의 설계와 구현에 목적을 두었다. 통합시스템은 CA가 가지고 있는 동적 공간 모델 작성의 편리성, 효율성 및 우수성과 GIS가 가지고 있는 다양한 공간 데이터의 입력, 처리, 저장/관리 기능을 효과적으로 활용할 수 있도록 설계되었다. 또한 사용자의

편의를 고려해 모델 작성과 실행에 요구되는 각종 도구들을 개발하여 통합시스템에 추가하였으며 기존 GIS의 사용자 인터페이스를 확장하여 통합시스템의 모든 기능들을 접근할 수 있도록 구현하였다.

이러한 CA-GIS 통합시스템은 성능분석 결과에서 나타난 바와 같이 기존 GIS에 비해 동적 모델 실행 성능이 우수한 것으로 판단되며 현재 GIS가 지니고 있는 동적 공간 모델링 기능의 취약성을 대폭 보완할 수 있을 것으로 생각된다. 실용적인 측면에서도 CA-GIS 통합시스템은 보편화된 컴퓨팅 환경과 상용 GIS를 기반으로 하고 있어 도시성장 예측모델 개발과 같은 실제적인 동적 공간 모델링 연구 수행에 효과적인 도구로 활용 될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 박수홍, 1997, CA-GIS 통합시스템을 이용한 GIS 연산의 구현, 한국 GIS 학회지 제5권 제1호 pp.99-113
- Agarwal, C., Green, G. L., Grove, M., Evans, T. and Schweik, C., 2000, "A Review and Assessment of Land Use Change Models: dynamics of space, time, and human choice", 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modelling.
- Batty, M. and Y. Xie, 1994, "From cells to cities", Environment and Planning B: Planning and Design, Vol. 21, s31-s48.
- Clarke, Keith C. and Gaydos, Leonard J., 1998, "Loose-coupling a cellular automaton model

- and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 12, No.7, pp.699-714.
- Green, D. G., A. P. N. House and S. M. House, 1985, "Simulating spatial patterns in forest ecosystems", *Mathematical and Computers in Simulation*, Vol. 27, pp. 191-198.
- Gutowitz, H., 1991, *Cellular Automata: Theory and Experiment*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Itami, R. M., 1988, "Cellular automata as a framework for dynamic simulations in geographic information systems", *GIS/LIS'88 Proceedings*, pp. 590-507.
- Kirtland, D., L. DeCola, L. Gaydos, W. Acevedo, K. Clarke, and C. Bell, 1994, "An analysis of human-induced land transformations in the San Francisco Bay/Sacramento area," *World Resource Review*, Vol. 6, No. 2, pp. 206-217.
- Li, Xia and Yeh Anthony Gar-On, 2000, "Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 14, No.2, pp. 131-152.
- Nyerges, T. L., 1992, "Coupling GIS and Spatial Analytical Models", *Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Data Handling*, Charleston, South Carolina, pp. 534-543.
- Silvertown, J., S. Holtierm, J. Johnson, and P. Dale, 1992, "Cellular automaton models of interspecific competition for space - the effect of pattern on process," *Journal of Ecology*, Vol. 80, pp. 527-534.
- Park, S., 1996, *Integration of Cellular Automata and Geographic Information System for Modeling Spatial Dynamics*, Unpublished Ph. D. Dissertation, Dept. of Geography, University of South Carolina
- Park, S., 1997, *Implementation of dynamic spatial models using an integrated Cellular Automata and Geographic Information System*, *대한지리학회지 제32권 제3호* pp.371-386
- Park, S. and D. F. Wagner, 1997, "Incorporating cellular automata simulators as analytical engines in GIS," *Transactions in GIS*, Vol 2., pp. 213-231.
- Tobler, W. R., 1979, *Cellular Geography*, in Gale and Olsson (eds.), *Philosophy in Geography*, Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, pp. 379-386.
- Wagner, D. F., 1997, *Cellular automata and geographic information systems*, *Environment and Planning B*, Vol. 24, pp. 219-234.
- White, R. and G. Engelen, 1994, "Cellular dynamics and GIS: modeling spatial complexity", *Geographical Systems*, vol. 1, pp. 237-253.
- Wu, F., 1998a, "Simulating Urban Encroachment on rural land with fuzzy-logic-controlled cellular automata in a geographical information system", *Journal of Environmental Management*, Vol. 53, pp. 293-308.
- Wu, F., 1998b, "SimLand: a prototype to simulate land conversion through the

integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 12, No. 1, pp. 63-82.

Wu, F., 2000, "Simulating artificial cities in a

GIS environment: urban growth under alternative regulation regimes", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 14, No.7, pp. 625-648.