농촌계획
Vol. 10, No. 4, 2004 (9-18)

GIS-CA 기법을 이용한 도시확산 지역의 공간적 모의

김대식 · 정하우*
충남대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 · *서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

Spatial Simulation of Urban Expansion Area using GIS and CA Technologies

Kim, Dae-Sik · Chung, Ha-Woo*
Dept. of Agricultural Engineering, College of Agri. & Life Sciences, Chungnam Nat'l Univ.
**Dept. of Agricultural Engineering, College of Agri. & Life Sciences, Seoul Nat'l Univ.*

ABSTRACT : The purpose of this study is to simulate spatially the urban expansion phenomena with a cellular automata (CA) technique using GIS. A study area, Suwon city, was selected for test of model verification and application with the classified land-use maps of three data years: 1986, 1996, and 2000. The urbanized potential maps were generated with seven criteria of one geographic factor (slope of land), and six accessibility factors (time distances from city, national road, Seoul, station, and built-up boundary), considering their weighting values, which were optimized by WSM (weighted scenario method for intensity order) combined a ranking method and a AHP technique. The optimized weighting values at the urban expansion between 1986 and 1996 were applied to verify the CA model for the other expansion between 1996 and 2000. The results of model application showed that urban sprawl phenomena of the urban expansion toward rural area can be simulated spatially and temporally with several boundary conditions considering various scenarios for the criteria and parameters of the model. Ultimately, this study can contribute to reference data for land-use planning of urban fringe areas.

Key words : AHP, CA, GIS, Land-use planning, Sprawl, Urban expansion

I. 서 론

도시의 팽창은 인구증가와 더불어 날로 증가하는 도시적 토지이용의 수요를 그 주변 농촌지역으로 확산시키는 필연적인 현상이라 할 수 있다. 도시적 토지이용의 확산이 체계적인 토지이용계획을 수반하지 못하면 농촌지역의 농경지나 산림을 무질서한 형태로 잠식하는 스프롤(Sprawl) 현상을 초래하기도 한다. 이러한 도시확산의 추세로부터 농촌지역의 토지이용 질서를 유지하고 농촌다움을 보전하기 위해서는 방어적 측면에서 도시확산에 관한 연구를 수행할 필요가 있으며(김대식, 2003, 김대식과 정하우, 2004), 도시화의 잠재적 가능성을 고려한 도시지역 확산에 관한 실천적 연구가 필요하다. 공간적인 도시지역의 확산은 도시형태를 연구하는 분야와 토지이용변화 모델링 분야에서 주로 다루어져 왔으며, 토지이용 변화 모델링은 시간에 따른 토지 이용 변화 상태를 모의하는 것으로서, 토지이용 변화에 관한 천이 규칙을 따라 격자자동변환기법(cellular automata, CA)에 의해 변화 현상을 재현한다.

CA기법은 산불 모델링, 토지이용 변화 모델링, 기후변화 모델링, 촌락 주거지 변화, 도시 성장 모델링 및 식생 변화 모델링 등 다양한 분야에 이용되어 왔으며, CA-GIS 통합 시스템에 관한 연구도 활발하게 진행되어 왔다. Brown과 Johnson(1985)은 도시성장의 모의를 위해 형태학의 지배를 받는 규칙을 설정하고 컴퓨터 시뮬레이션으로 도시발달의 역사적 과정을 해석하였고, Batty 등(1989)은 도시 성장의 형태를 모의하였다. Bruijn은 항공사진을 사용하여 보다 자세한 방법으로 주거지 개발을 모의하였으며, Brights는 개발 요인들의 합으로 계산되는 토지 적성 지수에 의해 토지이용 변화를 모의하였다(Wu, 1998). White와 Engelen(1993)은 다양한 토지이용 형태들의 공간분포를 모의하였고, Batty와 Xie(1994)은 도시의 특별한 공간 구성의 진화를 모의하여 실제

Corresponding author : Kim, Dae-Sik
Tel : 042-821-5795
E-mail : drkds19@cuvic.cnu.ac.kr

도시와 비교한 바 있다. Xu와 Lathrop(1995)는 격자기반의 GIS에서 확산 현상의 모의를 위한 정확도를 개선한 바 있으며, Batty와 Longley(1986, 1987), Erickson과 Jones (1997)는 도시형태의 모의모형을 위하여 프렉탈(fractal) 기법을 응용하였다. Wu와 Webster(1998)는 CA와 다기준 평가법의 연결을 통하여 토지이용상태를 개발지역과 미개발지역의 두가지 형태로 구분하고 미 개발지역이 개발지역으로 변화하는 과정을 모의하였으며, Yeh와 Li(1998)는 GIS를 이용하여 급속히 도시화 되어가는 농촌지역의 도시화를 조절하기 위한 지속가능 토지개발 모형을 개발한 바 있다. 정재준 등(2002)는 도시성장의 형태를 외연적 성장, 비지적 성장, 방사형 성장의 세 가지로 분류하여 모의한 바 있고, 김대식과 정하우(2002)는 소규모 마을의 성장을 CA를 이용하여 모의한 바 있다.

그러나 많은 연구들이 도시확산 형태 모의에서 결정론적 모형이 갖추어야 하는 결과의 정확성 검정을 위해 프랙탈 차원 해석 등 형태학적 검정방법을 사용하므로서 거시적으로 도시의 형태에 관한 유사성 또는 확산경향을 측정하였으나 실천적인 측면에서 재현 결과의 정확도를 검정하는 수단을 강구하지 못하였다. 본 연구에서는 도시확산을 공간적으로 모의할 수 있는 물리적 모형을 구현하기 위하여, 새로운 개념의 도시확산 포텐셜 최적화 기법을 도입하고, CA 모델을 실용적으로 구현하며, 결과의 정확도 검정을 위한 모형의 보정과 검정 단계를 거쳐 도시확산을 실천적으로 모의할 수 있는 방법을 개발하고자 한다.

II. 연구방법 및 모형의 구성

1. 연구방법

본 연구에서는 도시확산지역을 공간적으로 모의할 수 있는 연구의 절차를 그림 1과 같이 구성하였다. 모형의 입력자료로서 첫번째 자료는 도시확산 가능성을 나타내는 포텐셜 지도 (potential map)인데, 이것은 다양한 공간인자들을 평가인자(criteria for potential)로 구성하여 계량화된 인자들의 점수와 각 인자들의 중요도(weighting factor)로 곱한 후 전체 점수를 표준화하여 구할 수 있으며, 두번째 자료는 과거의 시간대별 토지이용도로부터 도시확산지역의 실측값을 가지는 지도를 구하는 것으로서 인공위성 영상자료로부터 토지이용도를 분류한 후 확산된 도시지역을 추출하여 구할 수 있고, 세번째 자료는 확산지역의 제한 인자로서 그린벨트, 농업진흥지역, 그리고 공항 등과 같은 특수시설지역을 토지이용변화가 발생하지 않는 지역(no-change area)으로 설정

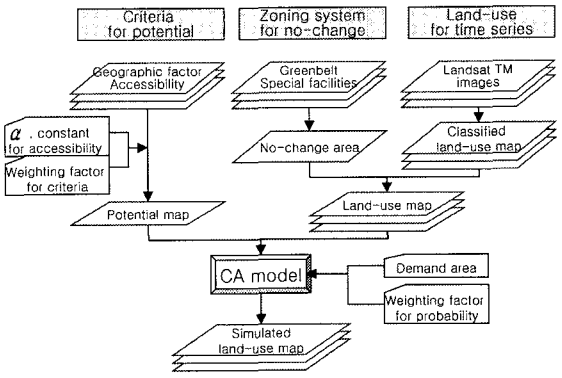

그림 1. Research methodology and GIS coverages according to modeling process.

하여 구축할 수 있다. 확산제한 지역 지도는 추출된 토지이용도와 결합하여 확산제한 지역을 가진 하나의 토지이용도로 구축하여 사용할 수 있으며, 최종적으로 CA 모형은 도시확산 포텐셜지도와 시계열 토지이용도를 입력자료로 가지게 된다. 구비된 입력자료와 확산지역의 면적 및 확산에 관련된 확률을 구하는 가중치 등을 추가 입력자료로 설정하여 모형은 최종적으로 모의 확산된 도시지역을 재현한 결과를 지도로 출력하도록 구성하였다.

2. CA 기법 및 모형의 개념

CA는 토지 변화 모델링의 기본 원리로서 Chapin & Weiss가 CA의 개념을 정리하였다(Wu, 1998). 이것은 이산(discrete)적인 시간과 공간에 기초한 비선형 동적 모델로서 기본단위는 하나의 셀로 설정되고, 셀의 상태는 모든 셀에 공통적으로 적용되는 변화규칙에 의해 결정되며, 거리나 방향에 의해 구성되는 주변 셀들의 상태에 의해 변화되는 것으로서 구성요소는 셀 공간(cellular space), 지역상태(local states), 주변 셀(neighbourhood cell) 및 변화규칙(transition rule)의 네 가지이다. 주거지 입지 모의발생 또는 도시 토지이용 변화 모델링에 관한 일반적 원리는 한 격자가 t시간에서 $t+1$시간으로 토지이용상태가 변해가는 것을 모의하는 것이다. 이 변화에 대한 함수는 다음 식 (1)과 같은 일반적인 함수로 표현된다(김대식과 정하우, 2002).

$$L_i^{t+1} = F(L_i^t, N_i^t, \mathrm{T}^t) \quad (1)$$

여기서, i는 격자의 위치, t는 시간, L_i^{t+1}은 $t+1$시간에, i격자의 토지이용 상태, L_i^t는 t시간에, i격자의 토지이용상태, N_i^t는 t시간에 i격자의 주위상태(neighbourhood states), T^t는 t시간의 토지이용 변화 규칙으로서 t시간에 T개의 토지이용 형태가 $t+1$시간에 T개의 토지이용 형태로 변

표 1. Transition rule and land conversion matrix in T states

$\rightarrow v\ t+1$ / $\downarrow u\ t$	$L_i^{t+1}=v=1$	·	$L_i^{t+1}=v=m$	·	$L_i^{t+1}=v=T$
$L_i^t=u=1$	$P^t_{i,11}$	·	$P^t_{i,1m}$	·	$P^t_{i,1T}$
·	·	·	·	·	·
$L_i^t=u=m$	$P^t_{i,m1}$	·	$P^t_{i,mm}$	·	$P^t_{i,mT}$
·	·	·	·	·	·
$L_i^t=u=T$	$P^t_{i,T1}$	·	$P^t_{i,Tm}$	·	$P^t_{i,TT}$

화될 각각의 확률로 구성된 $T\times T$의 매트릭스 형태를 가진다. 식 (1)에서 L_i^t에서 L_i^{t+1}로 변화하는 과정은 비결정론적 방법으로 예측될 수 있는데, t시간의 토지이용 상태와 주위상태로부터 $t+1$시간에 토지이용 상태가 변화될 확률을 나타내면 식 (2)와 같이 표현된다(김대식과 정하우, 2002).

$$L_i^{t+1} = F(P^t_{i,uv},\ \mathrm{T}') \tag{2}$$

여기서 u는 t시간의 토지이용 형태를 나타내는 변수로서 L_i^t와 같은 값을 가지며, v는 $t+1$시간의 토지이용 형태를 나타내는 변수로서 L_i^{t+1}와 같은 값을 가진다. $P^t_{i,uv}$는 i격자가 t시간에 u형태의 토지이용에서 $t+1$시간에 v형태의 토지이용으로 변화할 확률로서 토지이용 변화규칙을 T개의 토지이용 상태로 확장하여 일반화한 표 1과 같은 매트릭스로 정의된다.

토지이용 변화 확률 $P^t_{i,uv}$는 격자 자체의 토지이용 변화확률(격자 자체의 절대적 변화요소)만 고려한 경우와 이웃 격자의 영향(주위 격자에 의한 상대적 변화요소)을 함께 고려한 경우로 분류할 수 있는데, 두 가지 변화요소를 동시에 고려한 경우를 구체적인 방정식으로 표현하면 식 (3)과 같이 정의된다.

$$P^t_{i,uv} = (1 - w)SP^t_{i,uv} + wNP^t_{i,uv} \tag{3}$$

여기서 w는 확률가중치($w=1$이면 이웃 격자의 영향만 고려함)이며, $SP^t_{i,uv}$는 계산격자 자체의 절대적 변화요소에 의한 변화 확률, $NP^t_{i,uv}$는 이웃 격자의 영향을 받아 계산격자에 변화할 확률이다. 절대적 변화요소와 상대적 변화요소를 같은 비율로 고려할 경우의 w의 값은 0.5이다.

식 (3)에서 계산격자의 절대적 요소 $SP^t_{i,uv}$는 계산격자가 가지는 잠재적 토지이용 변화 확률로서 본 연구에서는 모델링 대상인 단일 토지이용 적성값을 확률로 변경하여 식 (4)와 같은 방법을 정의하였다.

$$SP^t_{i,uv} = f(LSS_{i,v}) \tag{4}$$

여기서, $LSS_{i,v}$는 i격자가 $t+1$시간에 토지이용 v가 될 토지적성 값(land suitability score, LSS)이며, f는 토지적성 값을 최대값이 1, 최소값이 0이 되도록 표준화하여 확률로 전환하는 함수이다. 즉, 식 (5)는 t시간 현재 토지이용 상태 u에서 $t+1$시간에 토지이용 상태 v로 변화될 잠재적 확률을 나타낸다.

식 (3)에서 상대적 요소인 이웃 격자가 계산격자에 영향을 줄 확률 $NP^t_{i,uv}$는 토지이용의 형태가 주위의 영향을 받아 변할 수 있다는 가능성을 반영한 것으로 일반적인 토지이용 변화 모델링의 중요한 요소인데, Yeh와 Li(1998)가 사용한 주위격자함수(neighbourhood function)를 적용하여 식 (5)와 같이 나타내었다.

$$NP^t_{i,uv} = \sum_{u=1}^{T} p(L^t_{i,v}|L^t_{q,u})B^t_{q,u} \tag{5}$$

여기서, q는 주위격자를 나타내는 첨자이며, $p(L^t_{i,v}|L^t_{q,u})$는 t시간에 주위격자의 토지이용 상태가 u일 때 계산격자 i의 토지이용 상태가 v일 조건부 확률이고, $B^t_{q,u}$는 주위격자 중에서 토지이용 상태가 u인 격자의 주위 격자의 총 면적에 대한 비율로 다음과 같이 정의된다.

$$B^t_{q,u} = NA_{q,u} \,/\, \sum_{u=1}^{T} NA_{q,u} \tag{6}$$

여기서 $NA_{q,u}$는 토지이용 상태가 u인 주위 격자의 면적이다.

식 (3)에서 계산된 확률은 표 2의 천이규칙에 따라 도시지역으로 변화유무를 판단한다. 설정된 확률함수와 천이규칙에 따라 도시확산지역의 모의는 김 등에 의해 개발된 LUPM 모델의 계산알고리즘을 따르며(김대식과 정하우, 204), 도시지역의 확산 포텐셜을 계산하는 알고리즘은 김 등에 의해 정의된 방법에 의한 것으로서, 본 연구에서는 LUPM을 도시확산 모의에 적용이 가능케 한 의미를 확장하였다.

표 2. Transition rule and land conversion matrix in 5 states

$\rightarrow v\ t+1$ / $\downarrow u\ t$	paddy field = 1	dry field = 2	built-up area = 3	etc = 4	restricted area = 5
paddy field = 1	$1-P^t_{i,13}$	0	$P^t_{i,13}$	0	0
dry field = 2	0	$1-P^t_{i,23}$	$P^t_{i,23}$	0	0
built-up area = 3	0	0	1	0	0
etc = 4	0	0	$P^t_{i,43}$	$1-P^t_{i,43}$	0
restricted area = 5	0	0	0	0	1

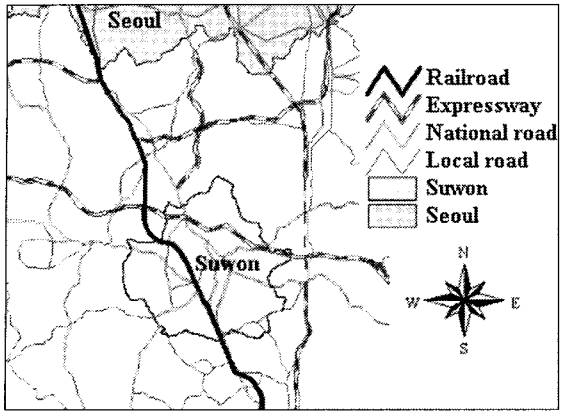

그림 2. Location of study area, Suwon city.

III. 모형의 적용

1. 대상지역

본 연구에서는 그림 2와 같이 수도권의 위성 도시로서 최근까지 인구가 급속히 증가되어 도시팽창이 가속화되고 있는 수원시를 대상지역으로 선정하였다. 1990년대를 기점으로 수도권의 교통망의 확충과 서울 인구의 분산정책 등으로 수원시의 팽창은 가속화되었다. 도시확산 모의를 위한 대상 시기는 1980년대 중반(1986년)에서 1990년대 중반(1996년)사이의 10년 동안과 1990년대 중반에서 2000년대 초반까지 두 단계의 시기에 대하여 모형의 보정과 검정을 위한 자료를 구축하여 사용하였다(김대식과 정하우, 2004).

2. 자료구축

가. 도시확산자료의 구축

본 연구에서는 연구대상지역을 포함하는 LANDSAT 5 위성의 궤도 116-34(path-row)에 해당하는 1986년 4월 15일, 1996년 4월 10일, 그리고 2000년 5월 7일의 영상들에 대하여 28개, 27개, 27개 포인터의 각각 GCP를 설정하고 RMS 값을 0.5이하로 기하보정을 한 후, Tasseled Cap 변환, 지수변화, 그리고 주성분 분석에 의한 변환으로 재구성된 10개의 밴드들에 대하여 감독분류를 실시하여 그림 3과 같이 도시화 건조지역, 논, 밭-초지, 임야, 나지, 그리고 수역 등 6개의 토지이용/피복을 분류한 결과, 검정지역(verification samples)에 대한 정확도 평가 결과가 1986년과 1996년의 두 영상에 각각 90%, 86%로 양호하게 나타난 기존 연구의 분류 결과를 이용하였으며(김대식과 정하우, 2004), 2000년 영상에 대하여는 본 연구를 위하여 정확도를 분석한 결과 표 3과 같이 95%의 정확도와 Kappa 계수가 0.93으로 높은 정확도를 보였다. 그림 3과 같이 분류된 결과로부터 도시화 지역을 재분류한 결과는 그림 4와 같이 각각 나타났다. 그림 4의 도시확산자료들이 모형의 보정과 검정에 기초 입력자료가 된다.

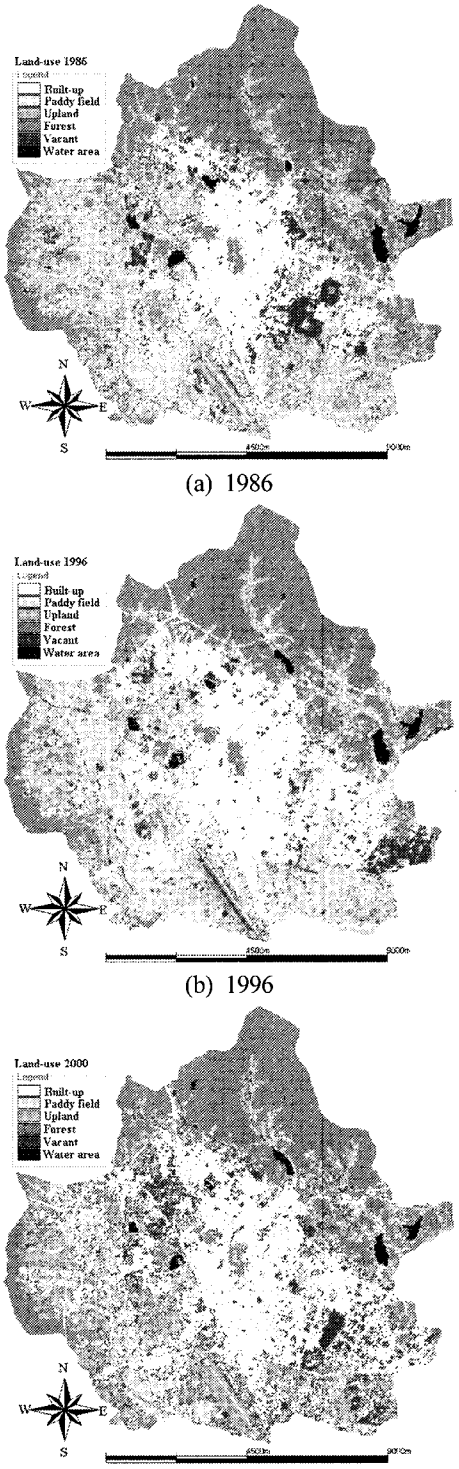

그림 3. Land-use map classified from satellite images of 1986, 1996, and 2000 years.

표 3. Error matrices and classification accuracy for Landsat TM at 2000

Classified \ Reference		Type of land-use/cover						Reference totals	Classified totals	Number of correct	Producers accuracy	Users accuracy	Kappa
		Bu	Pa	Dr	Fo	Va	Wa						
Type of land-use/cover	Bu	888	59	26	0	4	0	900	977	888	98.67%	90.89%	0.879
	Pa	0	583	23	0	0	2	700	608	583	83.29%	95.89%	0.949
	Dr	0	9	391	2	0	0	450	402	391	86.89%	97.26%	0.969
	Fo	0	0	3	1077	0	0	1079	1080	1077	99.81%	99.72%	0.996
	Va	12	47	7	0	116	0	120	182	116	96.67%	63.74%	0.625
	Wa	0	2	0	0	0	398	400	400	398	99.50%	99.50%	0.994
Column Total		900	700	450	1079	120	400	3649	3649	3453			

* Overall classification Accuracy 94.63%, Overall Kappa statistics 0.9318

Bu: Built-up, Pa: Paddy, Gr: Mixed grass for dry and vegetation, Fo: Forest, Va: Vacant, Wa: Water

Number of correct: Number of pixels with classified data = reference data

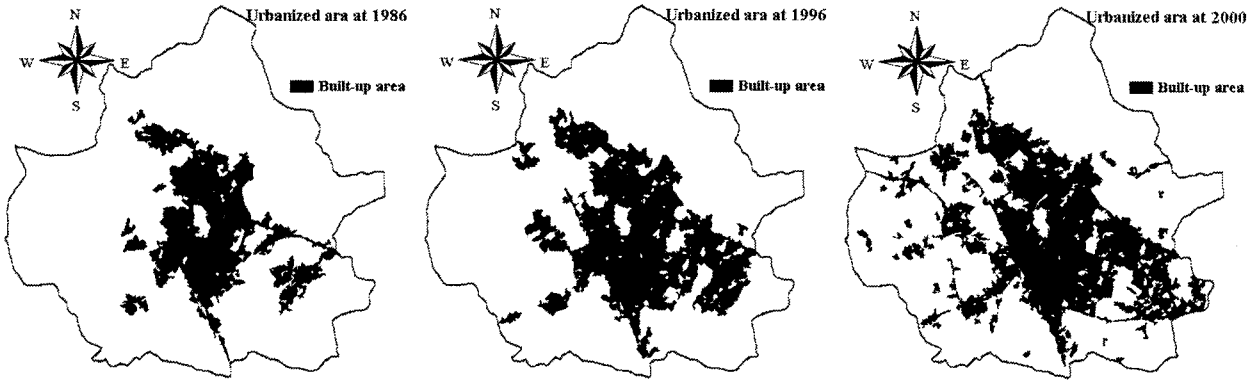

그림 4. Classified built-up areas of 1986, 1996, and 2000.

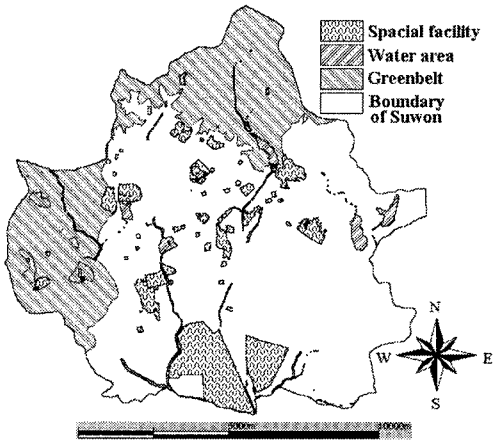

그림 5. No-change area.

나. 확산 제한 인자의 구축

모형의 확산 모의에 대한 경계조건으로서 확산 제한 인자는 그린벨트, 농업진흥지역, 그리고 특수시설 등으로서 도시화 포텐셜은 높으나 실제로 도시화가 진행되지 않는 지역으로 설정된다. 본 연구에서는 이와 같은 자료들에 대하여 그림 5와 같이 각각의 자료를 구축하여 하나의 GIS 지도로 구축하였다. 특수시설지역에는 공항, 저수지, 하천 등이 포함되며, 도로, 주거지, 산업지역 등을 포함하는 도시화 지역으로 변화되지 않는다는 전제조건을 설정하였다.

3. 도시확산 포텐셜 최적화

CA 기법으로 각 격자가 도시적 토지이용으로의 변화 유무를 결정하는 확률의 개념을 가진 포텐셜 지도는 WSM (weighted scenario method for intensity order)에 의해 각 평가기준의 가중치를 최적화하였다. 도시화 포텐셜을 위한 평가기준은 지형인자로서 경사(slope)와 접근성 인자로서 시간거리(time distance, TD)를 나타내는 도심에서 거리(TD from city), 국도에서 거리(TD from nat'l road), 서울에서 거리(TD from Seoul), 기차역에서 거리(TD from station), 톨게이트에서 거리(TD from toll), 도시화지역 경계에서 거리(TD from built boundary)의 여섯가지 인자를 포함하여 전체 일곱가지의 평가인자를 설정하고 순서대로 W_1에서 W_7까지 가중치를 설정하였다. 이들의 지형인자와 접근성 인자들에 대한 점수화 방법은 김대식과 정하우(2004)에 의해 사용된 점수화 방법을 사용하였다.

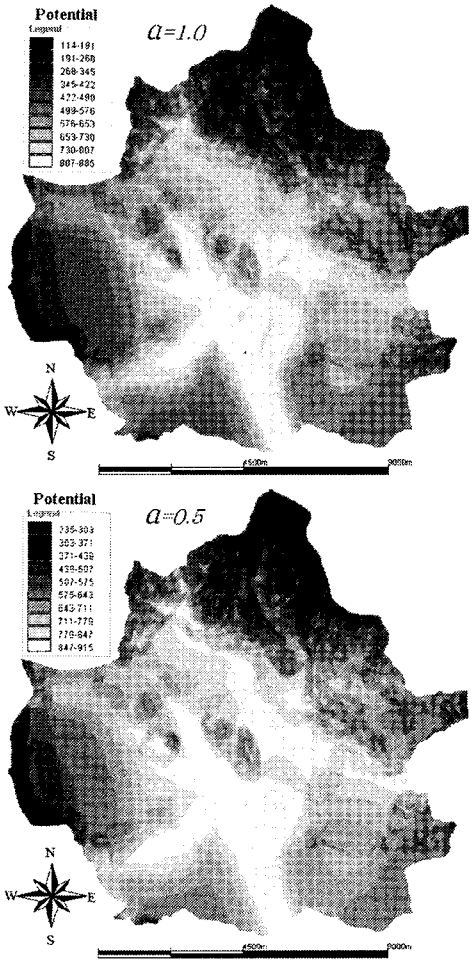

그림 6. Potential maps at between 1986 and 1996.

7개의 평가기준들에 대하여 점수화한 후, 각각의 가중치는 WSM법의 절차에 따라 표 4와 같이 전체 8개의 시나리오를 설정하였다. 시나리오 S1에서 S7은 각 평가기준을 순서대로 0.4의 값으로 가중시키고 나머지는 0.1의 낮은 값을 대입한 것이며, S8은 모든 가중치를 동일하게 적용한 것이다. 각각의 시나리오에 의해서 1986년에서 1996년의 10년간 도시지역으로 확산된 셀들에 대하여 포텐셜을 계산하여 1,000점 만점을 기준으로 나타낸 결과 표 5와 같이 나타났다. 표 5에서 보는 바와 같이 접근성 인자들의 점수계산에 사용된 중력모형형태의 거리감쇄함수의 지수인 α 값이 1.0과 0.5의 두 가지에 대하여 포텐셜 값을 계산하고 평균값의 크기에 따라 순위를 정한 결과 $W_1 \rightarrow W_7 \rightarrow W_3 \rightarrow W_5 \rightarrow W_2 \rightarrow W_6 \rightarrow W_4$의 순으로 나타났다.

설정된 우선순위를 본 연구에서 정의한 표 6의 AHP 중요도 점수표에 따라 표 7의 AHP 중요도 매트릭스를 작성하였으며, 이로부터 계산 결과 가중치는 $W_1 \rightarrow W_7 \rightarrow W_3 \rightarrow W_5 \rightarrow W_2 \rightarrow W_6 \rightarrow W_4$의 순으로 0.365, 0.240, 0.156,

표 4. Scenarios for the weighting values with a weighted factor (one 0.4, others 0.1)

weighted factor \ weighting value	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	Scenario
W_1 (slope)	**0.4**	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	S1
W_2 (TD from city)	0.1	**0.4**	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	S2
W_3 (TD from nat'l road)	0.1	0.1	**0.4**	0.1	0.1	0.1	0.1	S3
W_4 (TD from Seoul)	0.1	0.1	0.1	**0.4**	0.1	0.1	0.1	S4
W_5 (TD from station)	0.1	0.1	0.1	0.1	**0.4**	0.1	0.1	S5
W_6 (TD from tollgate)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	**0.4**	0.1	S6
W_7 (TD from built boundary)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	**0.4**	S7
No weighted factor	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	S8

표 5. Statistical analysis for potential score value of each grid to seven scenarios

	Statistic \ Scenario	Score value (total score 1,000 for each grid)							
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
α=1.0	Mean (1)	534.7	358.6	480.4	293.4	360.4	313.9	497.9	405.6
	Max	738.4	738.4	738.4	448.7	738.1	471.1	738.4	626.3
	Min	133.8	97.5	111.5	81.6	96.0	90.3	127.0	105.4
	Std	134.0	131.4	176.0	88.9	130.0	93.6	177.5	126.6
	Weighted factor	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	-
	Intensity order by (1)	1	5	3	7	4	6	2	-
α=0.5	Mean (2)	638.3	529.8	622.3	440.9	530.2	481.1	633.1	553.7
	Max	800.1	799.9	800.1	556.4	800.1	600.2	800.1	714.4
	Min	252.6	276.9	298.9	241.0	274.3	263.1	318.9	275.1
	Std	118.7	107.0	126.7	71.0	106.0	78.7	127.2	100.0
	Weighted factor	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	-
	Intensity order by (2)	1	5	3	7	4	6	2	-

표 6. The AHP scale for paired comparisons and definition of intensity order

Intensity of *importance*	Definition	In this study
1	Equal importance	No same intensity order
3	Weak importance of one over another	3 for 2 step difference (ex, order 1 and 3)
5	Essential or strong importance	5 for 4 step difference (ex, order 1 and 5)
7	Very strong or demonstrated importance	7 for 5 step difference (ex, order 1 and 6)
9	Absolute importance	9 for 6 step difference (ex, order 1 and 7)
2,4,6,8	Intermediate values between adjacent scale values	2 for adjacent order (ex, order 1 and 2) 4 for 3 step difference (ex, order 1 and 4)

표 7. AHP matrix for optimal weighting value using the intensity order

Weighting factor (Intensity order)	W_1 (1)	W_2 (5)	W_3 (3)	W_4 (7)	W_5 (4)	W_6 (6)	W_7 (2)
W_1	1	5.000	3.000	9.000	4.000	7.000	2.000
W_2	0.200	1	0.333	3.000	0.500	2.000	0.250
W_3	0.333	3.000	1	5.000	2.000	4.000	0.500
W_4	0.111	0.333	0.200	1	0.250	0.500	0.143
W_5	0.250	2.000	0.500	4.000	1	3.000	0.333
W_6	0.143	0.500	0.250	2.000	0.333	1	0.200
W_7	0.500	4.000	2.000	7.000	3.000	5.000	1
Calculated weighting value	0.365	0.066	0.156	0.028	0.102	0.043	0.240

0.102, 0.066, 0.043, 0.028로 각각 나타났다. 이렇게 계산된 가중치를 각각 평가인자 점수지도에 적용하여 전체 포텐셜을 계산한 결과 그림 6에서 보는 바와 같이 α 값이 1.0과 0.5의 두 가지에 대하여 1986년에서 1996년 사이의 포텐셜 지도와 같이 최적화된 결과를 보였다.

4. 모형의 검정 및 적용

최적화된 포텐셜 지도와 확산제한지역을 가진 세 시기의 토지이용도를 입력자료로 모형을 적용한 결과 표 8과 그림 7과 같이 나타났다. 모형의 적용과 검정은 식 (3)의 확률 가중치 w가 1.0, 0.5, 0.0의 세 가지 경우에 대하여 접근성 인자의 지수 α가 1.0과 0.5의 두 가지 경우를 고려한, 전체 6가지의 모의 시나리오를 설정하였으며, 모의의 시기는 1986에서 1996으로 확산된 경우, 그리고 1996에서 2000으로 확산된 경우의 두 가지를 모형의 검정단계로 설정하였으며, 정확도 평가는 도시전체면적(total area)에 대한 비교와 각 확산기간에 확산된 면적(expanded area)에 대한 비교의 두 가지를 고려하였다. 각각의 모의 시나리오에 대한 모형의 결과는 그림 7의 12가지의 모의 확산된 결과와 표 8에 각각의 경우에 정확도를 평가한 결과를 나타내었다. 모의 결과 w와 α의 값이 적을수록 정확도가 높아지는 경향을 보였으며, 1986년에서 1996년 사이에 최적화된 가중치(보정단계)를 1996년에서 2000년 사이의 변화에 적용(검정단계)하여 포텐셜을 구하고 모의한 결과, 정확도는 전체면적에 대한 비교에서는 검정단계의 정확도가 보정단계보다 약간 높게 나타났으며, 확산된 면적에 대한 비교에서는 약간 낮게 나타났다. 가장 높은 정확도를 보이는 $\alpha = 0.5$, $w = 0.0$의 경우에 전체면적과 확산면적에 대한 보정과 검정결과가 각각 85%, 89%와 49%, 39%로 실측치와 모의치의 격자가 정확히 일치하는 경우에 대한 정확도의 값이 매우 높게 나타난 결과를 보였으며, 그림 4의 실측치와 그림 7의 각각의 모의치를 비교해 보면 전체적인 도시지역의 모양은 거의 유사한 형태를 보여줌을 알 수 있다.

5. 결과 고찰

도시확산 포텐셜을 최적화하기 위하여 적용된 WSM 법에 의해 다수의 평가기준을 가진 지도자료로부터 격자단위의 특성을 고려한 계산을 요구하는 분포형 모델의 가중치 최적화 문제를 명확한 절차에 의해 합리적으로 해결할 수 있었으며, 이로부터 CA 모델에 의한 도시지역의 확산을 시간적 · 공간적으로 모의할 수 있었다. 모의의 경계조건으로서 확산제한인자를 설정하고 공개된 토지이용자료로부터 도시지역으로 변화되지 않는 지역을 설정할 수 있었으며, 과거의 도시확산 자료들은 위성영상으로부터 추출하여 사용함으로서 결과의 객관성 및 자료획득의 투명성을 확보할 수 있었다. 본 연구에서 사용된 자료들은 본 연구에서 설정한 절차에 따라 획득 및 가공처리가 쉽게 이루어질 수 있으므로,

표 8. The application results of CA model with the optimized urbanized potential

Condition of Comparison	Change	Observed area[1)]	Simulated area1)						Remark
			α = 1.0			α = 0.5			
			w=1.0	*w=0.5*	*w=0.0*	*w=1.0*	*w=0.5*	*w=0.0*	
total area	1986→1996	30,900	24,872 80	25,463 82	26,021 84	25,021 81	25,661 83	26,312 85	NC[2)] %[3)]
	1996→2000	37,924	32,967 87	33,177 87	33,363 88	33,180 87	33,407 88	33,665 89	NC %
expanded area	1986→1996	8,917	2,889 32	3,480 39	4,038 45	3,038 34	3,678 41	4,329 49	NC %
	1996→2000	7,024	2,067 29	2,277 32	2,463 35	2,280 32	2,507 36	2,765 39	NC %

*1) Number of cells with 30m×30m, 2) Number of cells, 3) Percent of simulated area to observed area

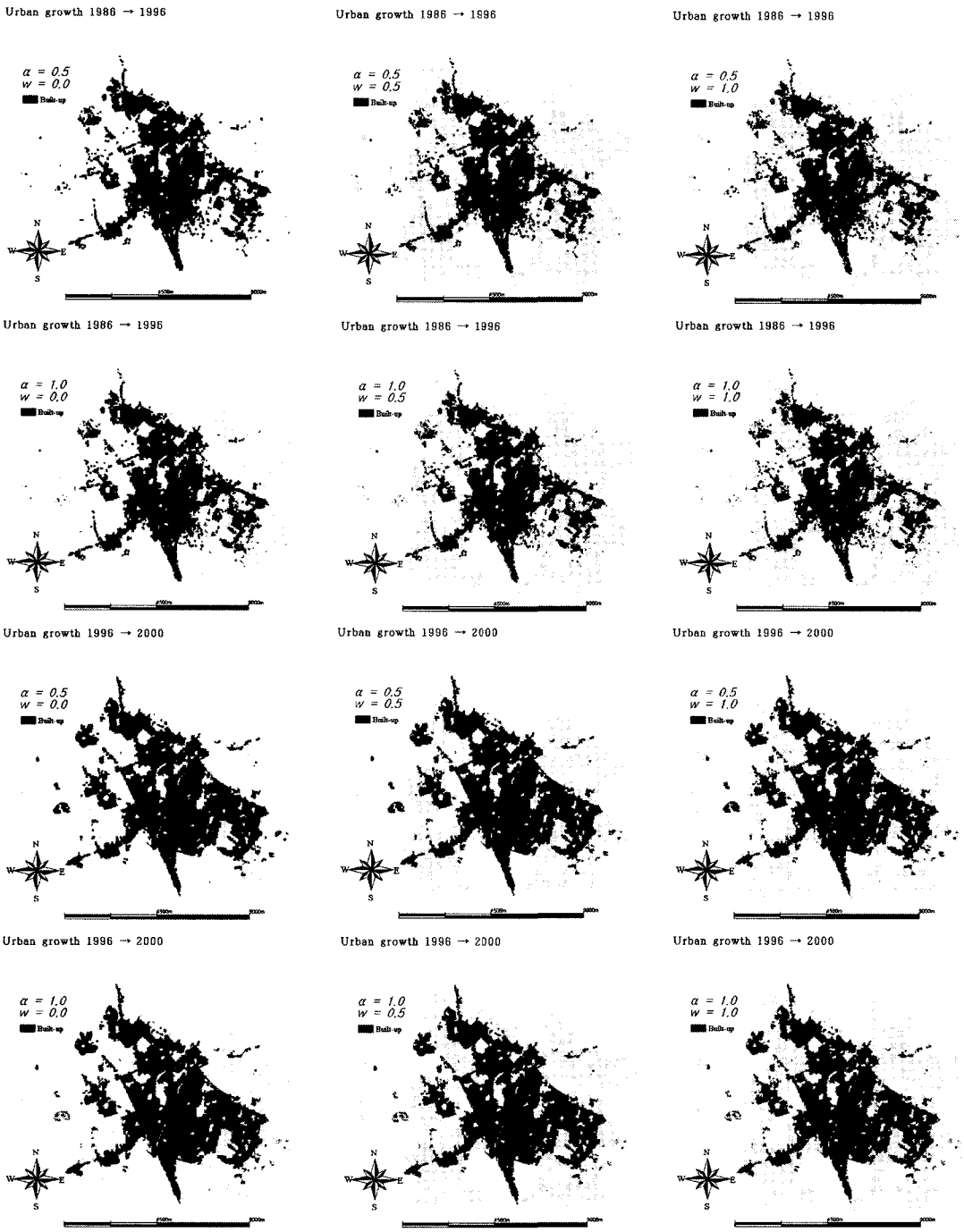

그림 7. Simulated results for changes from 1986 to 1996 and from 1996 to 2000.

향후 어떤 지역의 도시지역 확산 모의에 실용적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 나아가 주변에 있는 농지 및 산림지역의 잠식 등 농촌지역의 효율적인 토지이용 계획을 위해 다수 도시지역의 확산을 예측할 수 있으므로 도시와 농촌의 복합지역에 대한 합리적인 지역계획의 기초 분석 자료로 활용이 가능하리라 생각된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 CA 모형을 적용하여 도시확산의 공간적 모의를 시도하였는데, 세가지 주요 입력자료로서 도시확산 포텐셜의 최적화된 지도, 확산제한 인자의 구축, 그리고 인공위성 영상 Landsat TM을 이용한 토지이용 분류로부터 도시지역의 확산 자료를 구축하여 사용

하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 모형에 필요한 도시지역의 시계열 자료는 연구자가 필요로 하는 시기에 대하여 일반적인 지도에서 추출하기는 어려우므로, 연구지역을 포괄하는 인공위성 영상들을 합리적인 방법으로 분류하고 도시지역을 추출하는 기법을 도입하였다. 본 연구의 대상지역인 수원시의 도시화가 급속히 진전된 시기에 해당되는 1980년대, 1990년대, 그리고 2000년에 이르는 세 시기의 영상자료로부터 각각에 대한 1986, 1996, 2000년의 도시확산지역의 자료를 영상의 기하보정, 광학보정 등의 절차를 거쳐 높은 신뢰성을 가진 토지이용도로 분류하여 사용하였다.

2) 도시확산 포텐셜 최적화 기법에 의한 다기준 평가법의 평가인자들에 대한 가중치의 최적화와 더불어 확률함수의 확률 가중치(w), 접근성 인자의 점수화를 위한 중력모형형태의 지수(α)에 대한 민감도 분석을 병행한 도시확산의 모의에서 두 가지의 입력변수들의 값이 낮은 경우에 높은 도시확산 모의의 정확도를 보였으며, 이러한 입력자료의 시나리오를 다양하게 구성하므로서 도시확산 모의를 다양하게 시도할 수 있는 가능성을 발견하였다.

3) CA 모델의 도시확산에 적용하기 위하여 도시확산 포텐셜을 최적화하는 기법을 도입하였으며, 각 인자들의 가중치를 하나씩 차례대로 가중시킨 시나리오들을 1986년에서 1996년으로 실제 확산된 지역(격자들)에 대하여 계산한 포텐셜의 값이 높은 순서대로 각 가중치의 순위를 정한 후, 이 순위를 기준으로 AHP 중요도 매트릭스를 작성한 후에 고유벡터를 구하고 각 인자들의 최적화된 가중치를 계산하였다. 최적화된 가중치를 적용하여 다시 최적 포텐셜을 구하고, 이를 바탕으로 1996년까지 실제 확산된 격자의 숫자만큼 모의한 결과, 실측 도시지역 격자와 모의된 격자가 일치하는 정확도는 도시화된 격자들의 전체 면적에 대해서는 85%의 일치함을, 1986년에서 1996년까지 확산된 격자들만 추출한 후 이 면적에 대한 정확도는 49%로 일치함을 보였다. 1986년에서 1996년 사이에 최적화된 가중치를 1996년에서 2000년도의 확산에 대한 포텐셜 값을 계산하고, 이를 입력자료로한 모의에서는 정확도가 전체면적에 대해서는 89%, 확산된 면적에 대해서는 39%의 일치함을 보여주었다. 일치된 격자들에 대한 정확도 평가와 더불어 도시의 공간적인 형태 및 확산패턴은 실측결과와 모의결과가 매우 유사한 결과를 보였다.

이와 같은 연구의 결과로부터 도시확산 포텐셜을 고려한 CA모델에 의한 도시지역의 공간적 확산이 높은 유의성을 가지고 재현될 수 있음을 보여주었으며, 격자단위의 모의 정확도를 바탕으로 주변 농촌지역으로 도시확산의 패턴을 예측할 수 있는 가능성을 발견하였다. 따라서 도시발전 및 확산에 영향을 미치는 미래의 시나리오를 고려한 주변 농촌지역의 합리적 토지이용계획에 유용한 기초분석 자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김대식, 정하우, 2002, 농촌마을 개발계획 지원을 위한 토지이용계획 모형 (I) -GIS, CA 및 MCE 법을 이용한 개발-, 한국농공학회지 44(4) : 85-98
2. 김대식, 2003, 정밀수치정보를 이용한 도시중심에서 거리별 농지손실 및 도시화과정의 토지전용 특성분석 - 일본의 대표적 도시주변지역을 중심으로 -, 농촌계획 9(1) : 65-75
3. 김대식, 정하우, 2004, GIS와 RS를 이용한 도시확산 포텐셜 평가기법의 개발, 농촌계획 10(3) : 41-51
4. 정재준, 이창무, 김용일, 2002, 도시성장 분석 및 예측을 위한 셀룰라 오토마타 모델 개발, 대한국토도시계획학회 37(1) : 27-44
5. Batty, M. and P. A. Longley, 1986, The fractal simulation of urban structure, Environment and Planning A, 18 : 1143-1179
6. Batty, M. and P. A. Longley, 1987, Fractal-based description of urban form, Environment and Planning B: Planning and Design 14 : 123-134
7. Batty, M., P. Longley, and S. Fotheringham, 1989, Urban growth and form: scaling, fractal geometry, and diffusion-limited aggregation, Environment and Planning B: Planning and Design 21 : 1447-1472
8. Batty, M. and Y. Xie, 1994, From cells to cities, Environment and Planning B: Planning and Design 21 : s31-s48
9. Brown, F. E. and J. H. Johnson, 1985, An interactive computer model of urban development: The rules governing the morphology of mediaeval London, Environment and Planning B: Planning and Design 12 : 377-400
10. Erickson, B. and T. Lloyd-Jones, 1997, Experiments with settlement aggregation models, Environment and Planning B: Planning and Design 24 : 903-928
11. Kim, D. S., K. Mizuno, and S. Kobayashi, 2002, Modeling urbanization by population potential considering

greenbelt effect and various accessibility measurement methods, Journal of Rural Planning Association 20(4) : 253-264

12. Kim, D. S., K. Mizuno, and S. Kobayashi, 2003, Modeling urbanization by accessibility in rapid growth areas. ASCE, Journal of Urban Planning and Development 129(1) : 45-63
13. Wang, F. and Y. Zhou, 1999, Modelling urban population densities in Beijing 1982-1990: Suburbanization and its causes, Urban studies 36(2) : 271-287
14. White, R. and G. Engelen, 1993, Cellular automata and fractal urban form: A cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns, Environment and Planning A 25 : 1175-1199
15. Wu, F., 1998, SimLand: A prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules, International Journal of Geographical Information Science 12(1) : 63-82
16. Wu, F. and C. J. Webster, 1998, Simulation of land development through the intergration of cellular automata and multicriteria evaluation, Environment and Planning B: Planning and Design 25 : 103-126
17. Xu, Jianping and Richard G. Lathrop, 1995, Improving simulation accuracy of spread phenomena in a raster-based geographic information system, International Journal of Geographical Information Systems 9(2) : 153-168
18. Yeh, Anthony Gar-on and Xia Li, 1998, Sustainable land development model for rapid growth areas using GIS, International Journal of Geographical Information Science 12(2) : 169-189