

비선호 시설의 인구분포 관련 입지기준 평가를 위한 GIS-기반 방법론 연구 -원자력 발전소의 경우-

이상일* · 조대현**

GIS-Based Methods to Assess the Population Distribution Criteria for Undesirable Facilities: The Case of Nuclear Power Plants

Sang-Il Lee* · Daeheon Cho**

요약 : 본 논문의 주된 연구목적은 비선호 시설, 특히 원자력 발전소의 인구분포 관련 입지기준 평가를 위한 GIS-기반 방법론을 제안하는 것이다. 이 연구목적을 달성하기 위해 우선 IAEA, 미국의 NRC, 그리고 한국원자력안전기술원이 제시하고 있는 입지기준을 살펴보았다. 그 결과 원자력 발전소에 가장 가까이에 위치한 인구중심지까지의 거리를 최대화하는 것이 가장 중요한 입지 평가 원리임이 확인되었다. 이 원리를 실행하기 위한 GIS-기반 방법론은 서로 연관된 두 가지 하위 과제를 수행해야 하는 것으로 판단되었는데, 하나는 인구분포에 대한 정밀한 재현이고, 또 다른 하나는 인구중심지의 확인이다. 본 연구는 전자에 대해서는 대시메트릭 에어리얼 인터폴레이션 기법을, 후자에 대해서는 셀-기반 임계밀도 기법과 구역-기반 임계밀도 기법을 제시한다. 대시메트릭 에어리얼 인터폴레이션을 통해 다양한 공간해상도를 갖는 그리드 셀 단위의 인구밀도 분포의 재현이 이루어진다. 이것에 두 가지 인구중심지 확인 기법을 적용함으로써 특정한 임계밀도와 인구 규모 기준을 만족하는 인구중심지가 확인된다. 이 기법들을 우리나라 고리 원전 1호기의 사례에 적용하여 그 유용성과 한계를 평가하였다. 그 결과 적용된 기법과 투입된 파라미터 값에 따라 입지기준 평가의 결과가 달라질 수 있음이 드러났다. 본 연구는 지리공간분석 및 모델링 분야에서 개발된 기법을 입지 결정과 평가에 적용하는 시도의 활성화에 기여할 것으로 기대된다.

주요어 : 대시메트릭 에어리얼 인터폴레이션, 인구분포, 입지기준, GIS-기반 방법론, 비선호 시설, 원자력 발전소

Abstract : The main objective of the study is to propose GIS-based methods to assess the population distribution criteria for undesirable facilities such as nuclear power plants. First of all, a review of the relevant criteria was conducted for the official documents compiled by such institutions as IAEA (International Atomic Energy Agency), U.S. NRC (Nuclear Regulatory Commission), and some national institutes including the Korea Institute of Nuclear Safety. It is informed from the review that the fundamental principle underlying the various criteria is to maximize the distance between a plant and the nearest population center. It is realized that two interrelated GIS-based techniques need to be devised to put the principle into practice; sophisticated ways of representing population distribution and identifying population centers. A dasymetric areal interpolation is proposed for the former and cell-based and area-

* 서울대학교 지리교육과 부교수(Associate Professor, Department of Geography Education, Seoul National University), si_lee@snu.ac.kr

** 서울대학교 지리교육과 시간강사(Lecturer, Department of Geography Education, Seoul National University), dhcho@gmail.com

based critical density methods are introduced. Grid-based population distributions at various spatial resolutions are created by means of the dasymetric areal interpolation. By applying the critical density methods to the gridded population distribution, some population centers satisfying the population size and density criteria can be identified. These methods were applied to the case of the Gori-1 nuclear power plant and their strengths and limitations were discussed. It was revealed that the assessment results could vary depending upon which method was employed and what values were chosen for various parameters. This study is expected to contribute to foster the applications of methods and techniques developed in geospatial analysis and modeling to the site selection and evaluation.

Key Words : dasymetric areal interpolation, population distribution, siting criteria, GIS-based methods, undesirable facilities, nuclear power plants

1. 서론

새로운 시설물의 입지를 결정하거나 기존 시설물의 입지 적정성을 평가하는 문제는 중앙 및 지방 정부가 빈번하게 직면하게 되는 의사 결정이나 정책 평가의 중요 사안이다. 뿐만 아니라 이 문제는 입지 모델링이나 도시 및 지역 계획 분야를 포함한 다양한 공간과학 분야에서 널리 다루어져 온 학문적 연구 과제이기도 하다. 일반적으로 시설물의 입지는 단일한 요인에 의해 결정되기 보다는 다양한 요인들 간의 복합적인 관련성 속에서 결정되기 때문에 입지 결정이나 평가의 문제는 통상적으로 다기준 평가(MCE, multi-criteria evaluation)의 맥락에서 다루어진다. 이러한 다기준 평가는 다양한 속성들에 대한 공간 데이터를 요구하며, 그것들 간의 공간적 관련성을 파악하는 것이 핵심적인 사항이 된다. 이러한 의미에서 다기준 평가와 GIS(geographic information systems)의 결합은 자연스러운 귀결로 이해되며(Carver, 1991; Eastman, 1999), 주로 GIS를 공간의사결정지원시스템(SDSS, spatial decision support systems)으로 정식화하려는 시도와 밀접하게 관련되어 발전해 왔다(Nyerges and Jankowski, 2010; Sugumaran and DeGroote, 2011). 1990년대 이후 GIS-기반의 다기준 입지 모델링은 하나의 규범으로 자리잡게 되었다(Malczewski, 1999; 2004; 2006).

시설물의 입지 결정이나 입지 적합성 평가에서 어떠한 기준이 선정되느냐 혹은 선정된 기준들의 상대

적 중요성이 어떻게 주어지느냐의 문제는 대체적으로 시설의 성격 그 자체에 의해 결정된다. 이런 의미에서 선호 시설과 비선호 시설(undesirable facilities)을 구분하는 것은 중요하다. 왜냐하면 개입되는 기준의 종류나 상대적 가중치에서 비선호 시설은 선호 시설과는 상당히 다른 특징을 보이기 때문이다(Kirkwood, 1985). 비선호 시설은 주변 사람들에게 불쾌감을 유발하거나, 삶의 질을 하락시키거나, 보건이나 안전 상의 위협을 일으킬 가능성이 있는 입지 회피 시설이다(Erkut and Neuman, 1989). 비선호 시설은 크게 혐오 시설(obnoxious facilities)과 유해 시설(noxious facilities)로 구분되는데, 원자력 발전소나 방사성 폐기물 처리 시설과 같이 평상시나 사고 발생 시 주변 지역에 위협을 초래할 가능성이 높은 시설은 후자에 해당된다(Erkut and Neuman, 1989; Erkut and Moran, 1991).

선호 시설이든 비선호 시설이든 입지 결정과 평가에서 인구분포 관련 기준은 중요한 역할을 담당한다. 선호 시설의 경우에는 도달 거리(서비스 범위나 수요 극대화) 혹은 커버리지 개념의 관점에서 다루어지며, 비선호 시설의 경우에는 부정적 영향력의 최소화라는 측면에서 다루어진다(Farhan and Murray, 2006). 단순하게 말해 두 시설은 인구분포에서 서로 상반된 특징을 보이는 지역과 결부되어 있다. 본 연구는 비선호 시설의 인구분포 관련 입지기준에 집중하고자 한다. 그렇게 하는 첫 번째 이유는, 입지 기준에 대한 많은 연구가 주로 선호 시설에 집중되어 있어(Erkut and Neuman, 1989; Farhan and Murray, 2006), 비선호

시설의 인구분포 관련 입지기준에 대한 학술적 논의가 더 큰 의미가 있다고 판단하기 때문이다. 그러나 두 번째의 보다 중요한 이유는 하나의 입지기준으로서 인구분포가 갖는 의미가 선호 시설에서보다 비선호 시설에서 상대적으로 더 크다고 보기 때문이다. 선호 시설에서의 부적절한 인구분포 기준의 적용은 합리성의 절하 정도의 결과를 낳겠지만, 비선호시설의 경우는 일상적인 상황과 긴급상황 모두에서 인명과 재산 피해의 질적·양적 차이를 결정할 수 있기 때문이다. 결론적으로 말해, 비선호 시설은 인구분포 기준이 개입되는 방식에서나 그 기준의 상대적 중요도에서나 선호 시설과는 매우 다른 특성을 보인다.

비선호 시설로부터의 부정적 영향(방사능, 소음, 악취 등)은 일반적으로 시설물로부터의 거리가 증가함에 따라 감소하는 것으로 간주되기 때문에 영향의 대상으로부터 멀리 떨어져 입지하도록 하는 것이 입지 선정 및 평가에서 주안점이 될 수 밖에 없다(Melachrinoudis and Cullinane, 1985). 더 나아가 이러한 부정적 영향의 거리 조락 효과를 염두에 둔 적절한 인구분포에 대한 기준을 설정하는 것이 매우 중요한 사안이 된다. 예를 들어 쓰레기 매립지 혹은 처리장에 대한 연구들은 공히 인구 밀집지로부터의 이격성을 중요한 기준으로 삼고 있다(Erkut and Moran, 1991; Baban and Flannagan, 1998; Fatta *et al.*, 1998; Gómez-Delgado and Tarantola, 2006; Ferretti, 2011). 또한 원자력 발전소의 경우도 낮은 인구밀도와 인구중심지로부터의 이격성을 대원칙으로 제시하고 있다(IAEA, 1980; Macintosh, 2007; U.S. NRC, 2012).

본 연구의 주된 문제의식은 인구분포와 관련된 이러한 포괄적인 입지기준과 세부적인 평가 항목 및 평가 전략 사이에는 상당한 간극이 존재한다는 점이다. 원자력 발전소의 예를 들면, 발전소 주변 지역의 인구밀도 분포를 어떻게 재현할지, 고밀도의 인구중심지를 어떻게 규정할지 등에 대한 세부 사항들에 대해서는 거의 다루어지지 않거나 모호하게 다루어지고 있다. 이것은 입지 평가의 실행 과정이 마치 블랙박스처럼 존재한다는 것을 의미하며, 입지 평가 결과에 대한 의구심의 중요 요인이 될 수 있다. 또한 다기준 평가

에서 GIS의 역할이 증대해온 사실에 비추어보면, 인구분포 입지기준 평가를 위한 GIS-기반 방법론의 발달이 미약한 것은 다소 놀라운 사실이다. 원자력 발전소의 경우, 인구분포의 재현은 통상적으로 동심원과 섹터의 결합에 의해 생성되는 구역 별로 인구수와 인구밀도를 계산함으로써 주어지는데(IAEA, 1980; Openshaw, 1986), 지리공간분석 및 모델링(geospatial analysis and modeling) 분야의 최근 발전을 반영하는 보다 진보된 GIS-기반 방법론이 고안될 필요가 있다.

따라서 본 연구의 목적은 비선호 시설의 인구분포 입지기준 평가를 위한 GIS-기반 방법론을 제안하는 것이다. 이를 위해 비선호 시설 중 원자력 발전소의 인구분포 관련 입지기준에 집중하고자 한다. 연구 목적을 달성하기 위해 다음의 몇 가지 하위 과제를 설정한다. 첫째, 원자력 관련 국내의 기관이 제시하고 있는 인구분포 관련 입지기준에 대한 리뷰를 통해 입지기준 평가의 구체적인 과제를 설정한다. 둘째, 구체적인 과제를 수행할 GIS-기반 방법론을 제시한다. 셋째, 이 방법론을 우리나라의 원자력 발전소의 입지 평가에 적용하여 그 유용성을 검토한다.

2. 원자력 발전소의 인구 분포 관련 입지기준

1) IAEA의 입지기준

원자력 발전소의 입지 기준에 대한 대원칙은 IAEA(International Atomic Energy Agency, 국제원자력기구)에 의해 주어진다. 그것은 일반적인 가동 상황이나 긴급조치로 이어지는 사고 상황 모두에 있어 인구에 대한 방사능 피폭량은 가능한 낮은 수준으로 유지되어야 한다는 것이다(IAEA, 1978; 2003). IAEA가 발간한 안전 표준 시리즈(Safety Standards Series)(2002; 2003)에는 전 세계적 차원에서 통용되는 일반 원칙이 제시되어 있는데, 중요한 세 가지 사항을 정리하면 다음과 같다. 첫째, 외부구역(external zone)이라

는 개념이 제시되어 있는데, 이것은 인구 분포에 대한 평가가 이루어져야 할 대상 구역을 의미한다. 둘째, 고밀도 지역과 인구중심지 개념이 제시되어 있다. 고밀도의 기준이나 인구중심지 범위 설정에 대한 세부 기준은 제시되어 있지 않지만, 큰 규모의 도시화 지역이 특정한 환경 내에 포함되지 말아야 함을 함축하고 있다. 셋째, 인구 분포가 방향과 거리에 의거해 재현되어야 함이 제시되어 있다.

IAEA에서 간행된 문건 중 인구분포 관련 입지 규준에 대한 가장 구체적인 정보가 담겨 있는 것은 1980년에 간행된 안전 가이드이다(IAEA, 1980). 이 문건에는 일차적인 부지 선정의 7가지 방법론이 제시되어 있다. 이들 중 고정-지역 방법(fixed-area method)과 인구밀도 방법(population density method)은 본 연구에 대해 시사하는 바가 크다. 고정-지역 방법은 두 가지의 인구 분포 관련 규준을 제시한다. 하나는 거주 인구가 허락되지 않는 고정된 면적을 가진 배제구역과 그 외곽의 저인구지대(zone of low population)인 제한구역(restricted zone)이 지정되어야 한다는 것이다. 국가마다 기준이 다양하지만, 대체적으로 전자는 보통 반경 1km 미만이고, 후자는 대략 5km 정도이다. 또 다른 하나는 특정 규모 이상의 인구중심지(population center)가 원자로로부터 특정한 거리 내에 존재하지 말아야 한다는 것이다. 인구밀도 방법은 인구밀도를 평가하는 방법과 임계밀도의 결정을 위한 준거를 제시해 주고 있다는 측면에서 중요하다. 전자에 대해서는 인구밀도를 동심원(concentric rings)과 섹터(sectors)에 의거해 재현해야 함을 제시하고 있고, 후자에 대해서는 국가 전체의 인구밀도 값이 임계밀도 역할을 할 수 있음을 제안하고 있다는 의미에서 그러하다.

2) 미국 NRC의 입지기준

미국의 NRC(Nuclear Regulatory Commission, 원자력규제위원회)는 전세계에서 원자력 발전소의 입지 선정 및 평가를 위한 가장 구체적인 기준을 제시하고 있는 기관 중의 하나이다. NRC의 규제 기준은 CFR(Code of Federal Regulations, 연방규정집)의 10

편 100장(원자로 입지기준)에 잘 나타나 있다(U.S. NRC, 2012). Table 1은 중요한 사항을 정리한 것이다.

여기서 중요한 것을 정리하면 다음과 같다. 첫째, 원자력 발전소 입지 평가를 위한 세 가지 개념 즉, 배제구역(exclusion area), 저인구지대(low population zone), 인구중심지거리(population center distance)가 규정되어 있다. 특히 인구중심지를 위한 임계인구수는 25,000명으로 제시되어 있다. 또한 인구중심지는 행정적인 도시가 아니라 인구밀도 분포를 고려한 실질적인 도시화 지역이어야 한다. 둘째, 인구중심지거리는 원자로에서 저인구지대의 외곽경계까지 거리의 4/3 이상이어야 한다. 이것은 입지 평가의 가장 중요한 부분인 임계거리를 규정한 것이다. 셋째, 전체 지역은 저밀도지역과 고밀도지역으로 나뉘는데, 인구중심지는 고밀도지역에 포함되고, 원자로는 저밀도지역에 입지해야 한다. 하지만 저밀도와 고밀도를 나누는 기준은 제시되어 있지 않다. 그런데 NRC의 규제 지침(regulatory guide)을 살펴보면, 임계밀도와 관련된 구체적인 기준을 엿볼 수 있다. 1998년 4월에 개정·발표된 “규제 지침 4.7”(U.S. NRC, 1988)을 살펴보면 500인/mile²이 임계밀도 구실을 하고 있음을 알 수 있다. 이 임계밀도 값은 NRC의 표준 심사 계획(standard review plan)에도 동일하게 제시되어 있다(U.S. NRC, 2007). 요약하면, “임계밀도 500인/mile² 이상이면서 임계인구수 25,000명을 초과하는 인구중심지가 임계거리(원자로에서 저인구지대의 외곽경계까지 거리의 4/3) 내부에 존재해서는 안 된다”는 것이 미국 NRC가 제시하고 있는 입지기준의 핵심적인 사항이다.

3) 우리나라를 포함한 여타 국가들의 입지기준

위에서 살펴본 미국 NRC의 입지기준은 다른 많은 나라에서 그대로 혹은 약간의 수정을 거친 후 적용되고 있다. 일본의 경우, 원자력 발전소 입지 규준은 1964년 제정되고 1990년 개정된 원자로 입지심사 지침에 나타나 있는데, 비거주구역(non-residential zone), 저인구지대(sparsely-populated area), 인구밀집

Table 1. Main Contents of 10 CFR 100 by U.S. NRC (As of 2012). 미국연방규정집 10편 100장에 나타나 있는 원자력규제위원회 규정의 주요 내용(2012년 기준)

Sections	Contents
10 CFR 100 Reactor Site Criteria	
10 CFR 100.3 Definitions	Exclusion area means that area surrounding the reactor.
	Low population zone means the area immediately surrounding the exclusion area.
	Population center distance means the distance from the reactor the nearest boundary of a densely populated center containing more than 25,000 residents.
10 CFR 100.11 Determination of exclusion area, low population zone, and population center distance	(1) An exclusion area of such size that an individual located at any point on its boundary for two hours immediately following onset of the postulated fission product release would not receive a total radiation dose to the whole body in excess of 25 rem or a total radiation dose in excess of 300 rem to the thyroid from iodine exposure.
	(2) A low population zone of such size that an individual located at any point on its outer boundary who is exposed to the radioactive cloud resulting from the postulated fission product release would not receive a total radiation dose to the whole body in excess of 25 rem or a total radiation dose in excess of 300 rem to the thyroid from iodine exposure.
	(3) A population center distance of at least one and one-third times the distance from the reactor to the outer boundaries of the low population zone. In applying this guide, the boundary of the population center shall be determined upon consideration of population distribution. Political boundaries are not controlling in the application of this guide. Where very large cities are involved, a greater distance may be necessary because of total integrated population dose consideration.
10 CFR 100.21 Non-seismic siting criteria	(h) Reactor sites should be located away from very densely populated centers. Areas of low population density are, generally, preferred. However, in determining the acceptability of a particular site located away from a very densely populated center but not in a area of low density, consideration will be given to safety, environmental, economic, or other factors, which may result in the site being found acceptable.

Source: U.S. NRC, 2012

지대(densely-populated area)로 구분하여 그 기준을 제시하고 있다(KINS, 2008). 그러나 구체적인 임계 거리나 임계밀도 값은 명시되어 있지 않다. 오스트레일리아의 경우는 원자력 발전소의 입지 기준을 주요 기준(primary criteria)과 보조 기준(secondary criteria)로 구분하고 보조 기준의 첫 번째로 인구밀도 기준을 제시하고 있다. 그 내용은 “원자력 발전소와 인구밀도가 높은 지역 사이에는 적절한 버퍼가 존재해야 한다”는 것인데, 이때 버퍼는 당연히 거리를 의미한다(Macintosh, 2007). 이것 역시 미국 NRC의 10 CFR 100.21(h)를 준용한 것이다. 인도의 경우도 이와 유사한데, 원자로에서 500m까지를 발전소 경계(plant boundary)로, 500m~1.5km를 배제구역(exclusion zone)으로, 1.5~5km를 소독지역(strilised zone)으로 규정하였다(Roshan *et al.*, undated). 또한 소독지

역 내의 인구수는 20,000명보다 작아야 하며, 10,000명이 넘는 인구중심지로부터는 10km 이상 떨어져야 하며, 100,000명 이상의 인구중심지로부터는 30km 이상 떨어져야만 하는 것을 규정하고 있다(AERB, 1990; 1998).

우리나라의 경우 원자력 발전소의 인구분포 관련 입지 기준은 교육과학기술부고시 제2011-03호(원자로시설의 위치에 관한 기술기준 고시)에 간략하게 나타나 있는데, 앞에서 살펴본 미국 NRC의 10 CFR 100.11을 준용하는 것으로 되어 있다(MEST, 2011). 이 기준은 정성적으로 기술되어 있어 정밀평가에 적용하는 데 많은 어려움이 있다(KINS, 2008). 이러한 문제를 해결하기 위해 한국원자력안전기술원(Korea Institute of Nuclear Safety, KINS)은 국내외의 기술 기준을 종합적으로 고려하여 2011년 『경수로형

원자력발전소 규제기준 및 규제지침』을 발간하였다(KINS, 2011a; 2011b). 이 지침에 나타난 사항 중 인구분포 관련기준을 살펴보면 미국 NRC의 규정과 매우 유사하다. 실제적으로 피폭량의 크기, 제한구역, 저인구지대, 인구중심지에 대한 개념 규정, 인구중심지거리의 규정 등이 거의 동일하게 제시되어 있다.

3. GIS-기반 인구분포 관련 입지기준 평가 방법론

국제 기구와 여러 국가의 인구분포 관련 입지기준을 살펴본 결과, 인구분포 관련 입지기준 설정의 가장 중요한 원칙은 원자력 발전소까지의 최소거리를 최대화하는, 소위 맥스민(maximin)의 원칙임을 알 수 있다(Melachrinoudis and Cullinane, 1985; Erkut and Neuman, 1989; Plastria and Carrizosa, 1999; Emek and Kara, 2007). 다시 말해, 원자력 발전소에 가장 가까이 위치하고 있는 인구중심지까지의 거리를 최대한 멀리하는데 집중하는 것으로, 특정한 거리 내에 최근접 인구중심지가 존재하는지의 여부를 입지 적합성 평가의 가장 중요한 요소로 간주하는 것이다.

그런데, 이 원리를 실행하기 위해서는 다음의 서로 연관되어 있는 두 가지 세부적 과제가 수행되어야 한다. 첫째는 인구분포에 대한 정밀한 재현이다. 인구분포 관련 입지 평가는 결국 인구 수와 인구밀도라고 하는 두 가지 인구분포 관련 속성의 정확한 재현에 의존적이다. 위에서 살펴본 것처럼, 모든 국가나 기관에서 인구밀도의 평가는 행정단위별 인구밀도가 아닌 실질적인 인구밀도에 기반해야 함을 말하고 있다. 우리나라의 경우도 토지이용도 등을 고려하여 실제 인구분포에 가까운 인구분포도의 작성을 권하고 있다(KINS, 2011b). 이것은 만일 인구분포의 재현이 달라진다면, 입지기준 통과 여부도 달라질 수 있다는 의미에서 매우 중요한 사안이다. 둘째, 인구중심지의 확인이다. 앞에서 살펴본 것처럼, 높은 인구밀도를 보이면서 동시에 특정한 인구규모를 보이는 지역을 인구중심지라고 하고, 이 인구중심지들로부터 특

정한 거리만큼의 이격이 가장 중요한 입지 기준으로 제시되어 있다. 그런데, 여기서 인구중심지는 행정단위가 아니라 인구지리학적으로 규정되는 객체여야 한다. 따라서 인구중심지를 어떻게 규정하느냐, 혹은 인구중심지의 범역을 어떻게 설정하느냐가 매우 중요한 사안이 되며, 이것은 첫 번째 과제에서 인구분포가 어떻게 재현되느냐와 밀접한 관련을 맺고 있다. 다음에서 이러한 두 가지 과제를 평가하기 위한 GIS-기반 방법론을 제시하고자 한다.

1) 인구분포의 재현

현재까지 인구분포의 재현을 위해 가장 널리 사용되어온 것은 동심원과 섹터를 결합하여 일종의 인구분포를 위한 단위구를 생성하는 것이다. 예를 들어, Durfee and Coleman(1983; Openshaw, 1986: 215에서 재인용)은 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30마일의 6개 동심원과, 22.5°도 단위의 16개 섹터를 결합하여 구획을 나누고, 각 구획별로 인구 수 및 인구밀도 기준에 대해 평가할 것을 제안하였다. 여기서 중요한 기준은 모든 동심원에 대해 그 동심원까지의 누적 인구수 혹은 평균 인구밀도가 특정한 기준 보다 적거나 낮아야 할 뿐만 아니라 어느 연접한 두 섹터의 인구 수 혹은 평균 인구밀도도 특정한 기준 보다 적거나 낮아야 한다. 그러나 이러한 방법론의 가장 큰 문제점은 기준이 되는 인구분포의 재현을 센서스 데이터에 의존한다는 것이다. IAEA(2003)도 센서스 데이터에 대한 특정한 인터플레이션을 통해 인구분포 정보가 도출될 것을 권고하고 있다. Durfee and Coleman(1983; Openshaw, 1986:247에서 재인용)의 경우 센서스 구역 데이터를 동심원과 섹터의 결합을 통한 평가 구획체계 데이터로 전환하기 위해 거리-가중 인터플레이션과 정규화(distance weighted interpolation and normalization) 절차를 적용했다. 이 기법은 기본적으로 인구분포의 내적 동질성이 담보되지 않는 임의의 공간단위(여기서는 센서스 구역)를 사용했다는 측면에서 근본적인 한계를 가지는 것이다.

본 연구에서는 인구분포의 재현을 위한 GIS-기반 방법론으로 대시메트릭 에어리얼 인터플레이션

(dasymetric areal interpolation, 이하 DAI) 기법을 제안하고자 한다(Mennis and Hultgren, 2006; Langford, 2007). DAI는 대시메트릭 매핑과 에어리얼 인터플레이션을 결합한 기법이다. 우선 대시메트릭 매핑은 “해당 변수와 공간적 연관성을 가지는 보조 정보를 사용하여, 해당 변수의 분포 패턴을 보다 정확하게 재현하는 지도화 방식”을 의미한다(Eicher and Brewer, 2001; Mennis and Hultgren, 2006; Lee and Kim, 2007; Kim and Choi, 2011). 에어리얼 인터플레이션은 “하나의 공간단위 체계로 수집된 통계 정보(소스 데이터)를 그것과 경계 불일치를 보이는 또 다른 공간단위 체계(타겟 데이터)로 전환하는 과정”을 의미한다(Goodchild and Lam, 1980; Lee and Kim, 2007). 대시메트릭 매핑의 실행을 위한 일반식과 기본적인 알고리즘은 잘 확립되어 있으며(자세한 사항은 Mennis and Hultgren(2006)과 Lee and Kim(2007) 참조), 에어리얼 인터플레이션에서 가장 널리 사용되고 있는 ‘면적 가중법(areal weighting method)’의 실행 함수도 표준화되어 있다(자세한 사항은 Flowerdew and Green(1994) 참조). 결국 DAI 기법은 경계가 일치하지 않는 두 데이터를 결합하고자 하는 에어리얼 인터플레이션의 목적을 달성하기 위한 중간단계에서 보조 정보를 적절히 사용하는 대시메트릭 매핑 기법을 이용하는 것이다(Flowerdew and Green, 1992; Reibel, 2007; Reibel and Agrawal, 2007).

인구분포의 재현이라는 특정한 목적을 위해 DAI 기법이 사용되는 것을 보다 구체적으로 설명하면 다음과 같다. 대시메트릭 매핑은 구득가능한 가장 작은 공간단위(주로 최저차 행정구역 혹은 센서스 구역)별 인구 데이터를 기초로 토지이용 상황을 고려하여 보다 정밀한 인구분포도를 작성하는데 사용된다. 에어리얼 인터플레이션은 그것을 다시 서로 다른 해상도를 가진 그리드망으로 전환하는데 사용된다. 이 때 인구분포 재현의 최종 공간단위가 규칙적인 그리드 형태라는 점의 함의는 중요하다. 왜냐하면 DAI를 통해 제작된 그리드 맵은 모든 관련 연구의 기본이 될 수 있기 때문이다. 이 그리드 형태의 재현은 래스터 데이터일수도 있고 그리드 폴리곤 형태의 벡터 데이터일수도 있다. 뒤에서 살펴보겠지만 본 연구는 그리드 폴

리곤을 생성하는 방식을 취한다(Lee and Kim, 2007). 이 기법의 가장 큰 한계는 최적의 측정 스케일 혹은 최적의 공간해상도를 찾아야 하는 과제가 항상 개입된다는 점이다. 따라서 공간해상도 선택에 설득력 있는 정당화가 반드시 주어져야 한다. 한국원자력안전기술원이 제시하고 있는 규제지침에도 이와 유사한 접근법이 제시되어 있다(KINS, 2011b:4).

2) 인구중심지의 확인

인구중심지의 확인, 혹은 보다 구체적으로 인구중심지의 범역 설정은 훨씬 더 복잡한 과제이다. 앞에서 살펴본 것처럼 미국 NRC가 규정하고 있는 인구중심지는 임계인구수 25,000명 이상인면서 고밀도여야 하는데, 대략적으로 500인/mile²이 임계밀도 구실을 하는 것으로 보인다. 이 값을 km²으로 환산하면 약 192인/km² 정도인데, 이는 미국 전체의 평균인구밀도 32인/km²의 약 6배 정도에 해당하는 값이다. 인구중심지에 대한 규정은 오히려 우리나라의 경우가 보다 명확하다. 즉, 인구중심지는 “인구밀도가 국가 평균인구밀도를 초과하는 총인구 25,000명 이상의 인구밀집지역”으로 규정되어 있으며, “인구중심지 외곽 경계의 설정 및 평가는 공공기관의 최근 인구자료를 이용하여야 하며, 인구중심지 평가를 위한 인구분포도는 행정구역별 인구가 아닌 평가대상지역의 실제 인구 분포를 반영하여야 한다”고 규정되어 있는 것이다(KINS, 2011a). 대략 우리나라의 전체 인구밀도가 500인/km²인 것을 감안하고 미국의 경우를 원용하여 판단할 때 이 평가 기준은 매우 엄격하다고 얘기할 수 있다. 즉, 미국의 경우를 원용하면 국가 전체의 평균 인구밀도의 6배인 3,000인/km²이 기준이 되어야 하고, 이 경우 인구중심지가 국토 전체에서 차지하는 비중은 훨씬 작아질 것이기 때문이다. 즉, 입지 평가 기준을 통과하기가 훨씬 수월해진다.

본 연구에서는 인구중심지를 확인하는 GIS-기반 방법론으로 두 가지 대안을 제시하고자 한다. 그것들 각각은 ‘셀-기반 임계밀도 기법(cell-based threshold density method)’과 ‘구역-기반 임계밀도 기법(areal-based threshold density method)’이다. 셀-기반 임

계밀도 기법은 우선적으로 특정한 임계밀도를 설정하고 그것보다 높은 인구밀도를 보이는 셀을 선택한다. 선정된 셀들 중 변을 접하는 것들을 합역(spatial aggregation)함으로써 그리드 셀의 응집체로서의 구역을 확인한다. 이 구역들의 총 인구수를 계산하여 25,000명이 초과할 경우 그것을 인구중심지로 간주한다. 그리고 이 때의 셀-기반 임계밀도는 한국원자력안전기술원의 규제지침(KINS, 2011b: 5)이 권고하고 있는 우리나라의 전체 인구밀도(500인/km²)를 사용하기로 한다. 이 방법론의 장점은 개념적으로 간명하고 GIS에서 실행하기가 용이하다는 것이다. 그러나 그리드 셀이 연결하지 않을 경우, 인구중심지가 분

할된 것으로 간주된다는 단점이 있다. 예를 들어 중간중간 비주거지가 있는 경우, 서로 나뉘어지게 되면 25,000명 임계인구수 기준을 통과하지 못할 수도 있다.

구역-기반 임계밀도 기법은 셀-기반 임계밀도 기법과는 달리 최종적으로 도출되는 구역, 즉 인구중심지에 임계밀도값을 적용하는 것이다. 반복적인 셀 선택과 합역 과정을 통해 주어진 임계밀도값을 충족시키는 구역을 생성하고, 2차적인 기준을 적용하여 최종적으로 인구중심지를 확인하는 방식이다. 최종구역을 확인하기 위해서는 우선 셀-기반 임계밀도 기법과 동일하게 셀 수준에서의 임계밀도(예를 들어 전

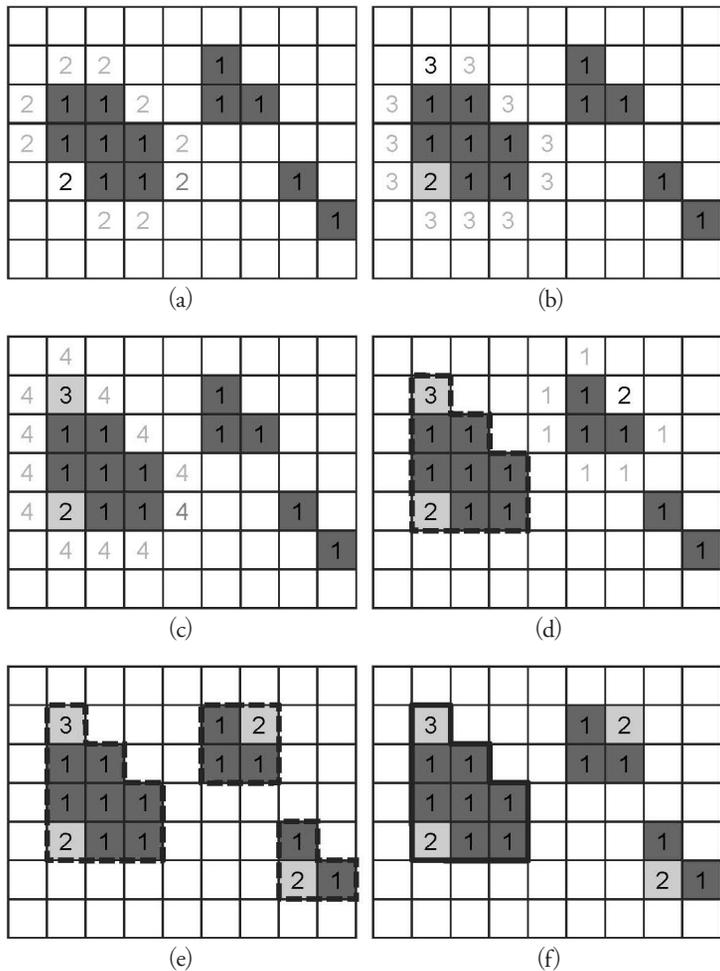


Figure 1. The Algorithm of the Area-Based Threshold Density Method. 구역-기반 임계밀도 기법의 알고리즘

국 평균인구밀도)를 충족하는 셀들을 최초 후보 구역으로 선택한 후, 각 개별 구역을 확장해가는 과정을 거친다(Figure 1(a)). 최초 후보 구역에는 구역밀도가 계산되어 있으며 그 값이 큰 순서대로 확장 과정을 거치는데, 인접 셀들을 추가해가며 구역 임계밀도를 충족하는지를 지속적으로 평가하게 된다. 구역 임계밀도를 셀 임계밀도와 동일하게 설정하면 경우에 따라 저밀도의 셀들을 과도하게 포함하게 될 수 있으므로 일반적으로 셀 임계밀도 보다는 더 높게 지정할 필요가 있다. 각 후보 구역을 확장해 가기 위해서는 인접한 셀을 평가해야 하는데, 이때 인접한 셀들 중 밀도 값이 가장 큰 셀을 선택하여 그 셀이 포함되었을 경우의 밀도와 임계밀도를 비교하게 된다. 그 결과 구역 임계밀도를 충족하게 되면 그 셀을 포함하여 더 확장된 새로운 구역을 설정하게 되고(Figure 1(b), 1(c)), 확장을 할 경우 임계밀도 기준을 통과하지 못할 경우 이 과정을 정지하고 후보 구역을 확정한다(Figure 1(d)). 최초 후보 구역 각각에 대해 위의 과정을 거치게 되면 이론적으로는 최초 후보 구역 수만큼의 최종 후보 구역이 확정될 수 있다(Figure 1(e)). 물론 도중에 근접한 후보 구역 간의 병합이 발생할 수도 있다. 최종적으로 파악된 후보 구역들에 대해서는 2차 기준, 즉 임계인구수 기준을 적용하여 인구중심지로 판정하게 된다(Figure 1(f)).

구역-기반 임계밀도 기법은 공간 클러스터의 범역을 설정하기 위해 제시된 AMOEBA 기법(Aldstadt and Getis, 2006; Lee *et al.*, 2010; Duque *et al.*, 2011)과 알고리즘 상에서 유사성을 보인다. 그러나 AMOEBA 기법은 공간 클러스터를 탐지하는 방법론이기 때문에 국지적 통계량을 이용해 그 통계량이 최대화되는 범역을 반복적 합역 과정을 통해 설정하는 반면, 본 연구가 제시하고 있는 기법은 임계밀도를 만족시키는 최대한의 한계선을 찾아 범역을 설정한다. 위에서 설명된 두 종류의 임계밀도 기법을 실행하기 위해서는 GIS의 다양한 오퍼레이션들이 이용되는데 본 연구에서는 ESRI ArcGIS 9.3의 VBA 스크립트를 이용하여 응용프로그램으로 작성하여 수행하였다.

4. 우리나라 고리 원전 1호기에 대한 사례 연구

사례 연구의 대상은 고리 원전 1호기이다. 따라서 이 사례연구의 상황은 새로운 입지를 선정하는 것이 아니라 기존 입지에 대한 재평가라고 할 수 있다. 인구분포는 늘 변화하는 것이므로 원자력 발전소의 경우 다른 입지 요인과 달리 지속적인 재평가를 필요로 한다. 이런 이유 때문에 IAEA나 미국의 NRC도 최초 입지 당시의 인구뿐만 아니라 미래의 추계인구를 산정하여 입지 평가에 사용할 것으로 권고하고 있다 (IAEA, 1980; 2002; 2003; U.S. NRC, 2007). 고리 원전 1호기를 사례로 삼게 된 것은 이 발전소가 2007년 6월 설계수명 30년이 끝나 재가동의 안전성 여부가 논란의 대상이 되었기 때문이다. 결론적으로 2007년 12월 6일 10년간의 부가적인 가동을 해도 안전성에 문제가 없다는 전문가 심사 결과가 도출되었다. 따라서 본 사례 연구는 재가동 여부를 결정하기 위해 인구분포 관련 입지기준 평가를 하는 상황을 상정한 것이다.

1) 연구 대상 지역 및 데이터

연구 대상 지역은 울산광역시의 울주군과 부산광역시 기장군을 포괄하는 지역으로, 2개 군, 4개 읍, 95개 행정리로 구성된다(Figure 2(a)). 본 연구에서 사용된 인구 데이터는 2006년 12월 31일을 기준으로 한 리단위 주민등록인구이다(총 인구: 130,756명). 실질적으로 인구는 야간 거주인구뿐만 아니라 주간 활동인구를 모두 고려해야 한다는 측면에서는(IAEA, 1980) 주민등록인구는 많은 한계를 가지고 있는 것이다. 향후에 농촌 지역에서 상주인구와 활동인구를 동시에 고려하여 인구분포를 재현하는 기법에 대한 논의가 필요할 것으로 보인다. 인구와 관련하여 또 하나 고려해야 할 점은 장애 추계인구이다. 특히 가동 기간 내에 인구분포에 영향을 주는 지역 계획의 효과는 반드시 고려되어야 한다. 이러한 측면에서 기장군에 총 4개의 택지개발지구가 개발 승인된 점을 감안할 필

요가 있다. 그것들은 정관면의 정관택지개발지구, 기장읍의 내리택지개발지구, 일광면의 일광택지개발지구, 철마면의 고촌택지개발지구 등이다. 이 지구들의 계획 인구를 모두 합하면 123,401명에 이르는데, 이것을 모두 포함할 경우 이 지역 전체의 인구 수는 254,157명에 이른다. 물론 이 택지개발지구로 이주해 올 인구가 모두 연구 대상 지역의 외부로부터 오는 것은 아니겠지만 인구수에 대해 최대한 보수적인 관점을 견지한다는 측면에서 내부 전입은 없는 것으로 간주한다. 또한 기존 행정구역도에 이러한 택지개발지구를 반영하기 위해 GIS의 지오프로세싱 툴을 적용하여 새로운 가상의 행정단위를 생성하고 계획 인구를 속성값으로 할당하였다(Figure 2(a)).

행정구역 기준의 인구를 바탕으로 DAI 기법을 적용하기 위해서는 연구 대상 지역의 토지이용현황에 대한 정보가 필요하다. 본 연구에서는 사례지역의 토지이용현황을 파악하기 위해 국토지리정보원이 제작

한 토지이용현황도(1999)를 사용하였다. 해당 지역의 1:25,000 토지이용현황도를 기본으로 하고 수치지형도 및 종이지형도를 참조하여 최대한 해당 시점의 토지이용 상황이 반영될 수 있게 조정하였다. 앞에서 언급한 택지개발지구 입지 예정 지역에 대해서는 도시관리계획 결정 지형도면고시도를 바탕으로 토지이용분류도에 포함시켰다. 그리고 나서 토지이용분류에서 대분류 ‘도시 및 주거지’, 중분류 ‘주거지 및 상업지’에 해당하는 것을 주거지로 하고 그 나머지를 모두 비주거지로 간주하는 이항 분류체계를 적용하였다. Figure 2(b)는 이 모든 사항을 바탕으로 최종적으로 도출된 이항 토지이용도이다.

행정구역도와 토지이용도는 데이터의 원천이 다르기 때문에 두 가지 부가적인 가공 과정이 요구되었다. 첫째, 두 레이어의 외부 경계(특히 해안선)가 일치하지 않아 이를 일치시킬 필요가 있었다. GIS의 지오프로세싱 툴을 이용하여 토지이용도의 바다 경계

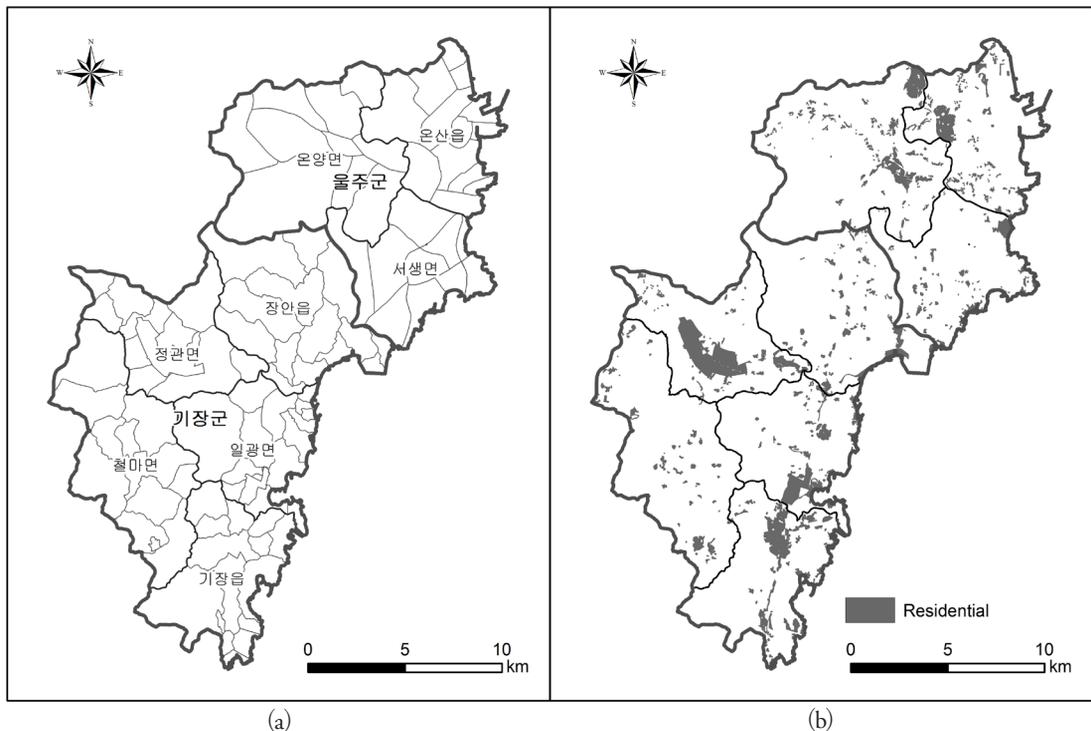


Figure 2. Data for the DAI Technique: (a) Administrative units, (b) Binary land-use map.
DAI 기법의 적용을 위한 데이터: (a) 행정구역도, (b) 이항 토지이용도

를 기준으로 조정함으로써 행정구역도와 토지이용도의 두 경계가 일치하도록 하였다. 둘째는 투영법의 결정이다. 두 지도는 통상적으로 특정 원점에 기반한 횡축메르카토르 도법이 적용된 상태로 배포되는데, 입지 기준을 평가한다는 측면에서는 이 도법의 적용은 불합리한 것으로 보인다. 원자로부터의 거리가 가장 민감한 결정 요소라는 점을 감안한다면 투영 속성 중 형태나 면적이 아닌 거리가 가장 중요한 고려 사항이 되어야 하기 때문이다. 이것은 미국의 NRC가 거리의 계산을 평면직각좌표계에서의 계산 방식이 아닌 경위도 값을 이용한 구체 혹은 타원체 상의 대원거리로 계산하도록 규정한 것에서 잘 나타나 있다(U.S. NRC, 1979). 이러한 의미에서 본 연구를 위한 투영법으로 원자로의 위치를 투영 원점으로 한 정거방위도법(azimuthal equidistant projection)을 사용하기로 한다(이 투영법에 대한 자세한 사항에 대해서는 Snyder(1987)와 Snyder and Voxland(1989) 참고).

2) 인구중심지 확인 및 입지기준 평가 결과

인구 수 속성을 포함한 행정구역도와 이항 토지 이용도를 이용하면 대시메트릭 매핑을 실행할 수 있다. 에어리얼 인터플레이션은 서로 다른 공간해상도를 갖는 6개의 격자망(1×1km, 750×750m, 500×500m, 250×250m, 100×100m, 50×50m)에 대해 실시되었다(Figure 3). 놀랍게도 원전으로부터의 최근린 인구중심지까지의 거리 기준은 미국과 우리나라 모두 “원자로부터 저인구지대 외곽경계까지 거리의 4/3배 이상”이라는 모호한 방식으로 제시되어 있다. 본 연구에서는 저인구지대 거리가 보통 5km 내외인 것(IAEA, 1980; U.S. NRC, 1979)을 감안하여 판정 기준을 7.5km로 설정하였다. 원전으로부터 그 거리에 해당하는 동심원을 그려 인구중심지의 거리 기준 부합 여부를 판단하였다.

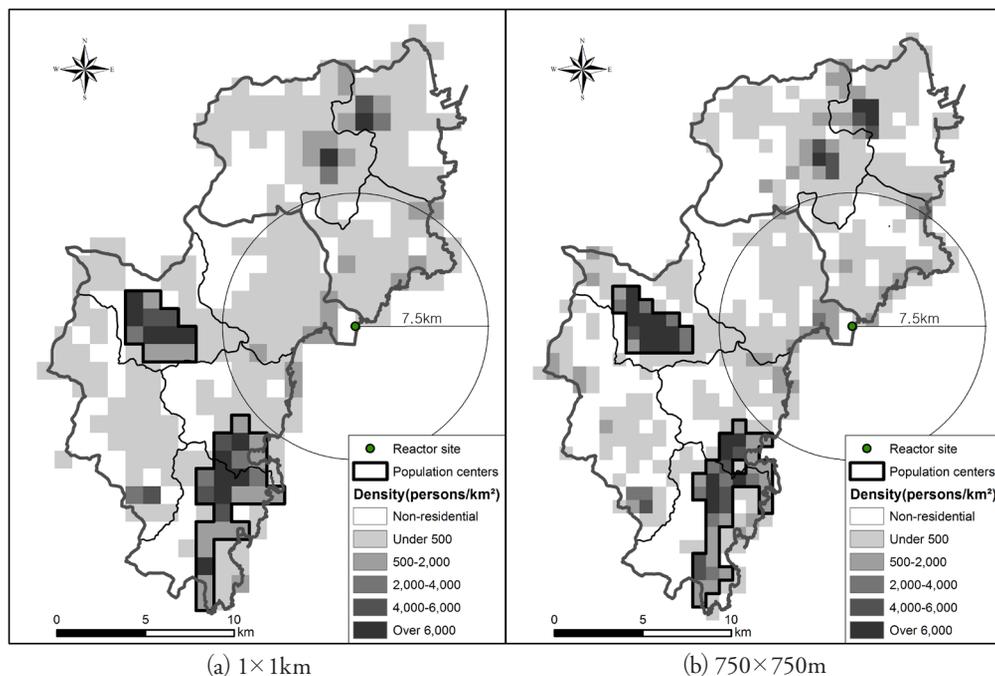


Figure 3. Detection of Population Centers Based on the Cell-Based Threshold Density Method.
셀-기반 임계밀도 기법에 의한 인구중심지의 확인(계속)

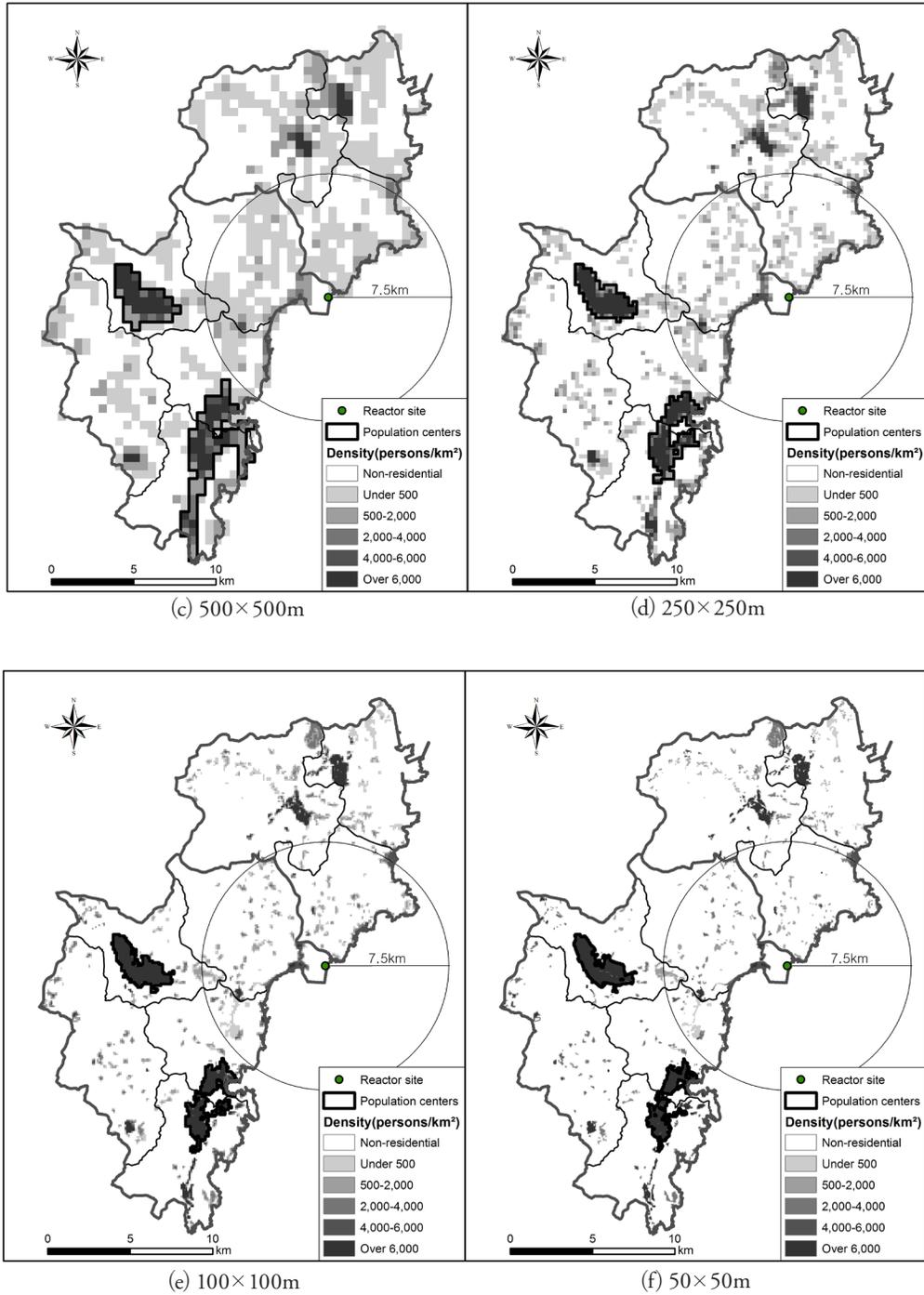


Figure 3. Detection of Population Centers Based on the Cell-Based Threshold Density Method.

셀-기반 임계밀도 기법에 의한 인구중심지의 확인

(1) 셀-기반 임계밀도 기법에 의한 인구중심지 확인 및 입지기준 평가

Figure 3에는 우선 6가지 공간해상도에 대한 인구 분포가 나타나 있다. 해상도가 높아 질수록(그리드 셀의 크기가 작아질수록) 500인/km² 이상 그리드 셀의 비중은 낮아지고, 최고 인구밀도 값은 높아지는 경향을 보여주었다(단 1×1km는 예외). 이것은 그리드 폴리곤의 크기가 클수록 일종의 균질화 효과(smoothing effect)가 나타나기 때문인 것으로 자연스러운 결과라고 볼 수 있다.

Figure 3에는 또한 셀-기반 임계밀도 기법에 의해 확인된 인구중심지가 나타나 있다. 인구중심지의 요건을 만족시키는 곳으로 모든 공간해상도를 망라해 2개가 확인되었는데, 편이상 정관신도시를 중심으로 한 지역을 ‘서부 중심지’로, 기장읍의 교리, 대라리, 동부리, 그리고 일광택지개발지구를 잇는 지역을 ‘남부 중심지’로 명명하고자 한다. Table 2에는 확인된 두 인구중심지에 대한 세부 사항이 나타나 있다.

우선 공간해상도가 높아질수록 인구중심지의 면적은 작아짐을 알 수 있다. 이는 공간해상도가 높아 질수록 그리드 셀의 연결성 요구(변을 접해야만 인구 중심지에 포함됨)를 만족시킬 가능성이 점점 낮아지기 때문이다. 서부 중심지의 경우 모든 해상도에서

약 88,000명의 인구 수를 유지하는 반면, 남부 중심지는 500×500m 정도까지는 약 80,000선을 유지하다가, 그 이상의 공간해상도에서는 6~7만 명 수준을 나타낸다. 특히 50×50m의 해상도의 경우, 남부 인구중심지는 두 개의 인구중심지로 분리되는데, 기장읍의 교리-대라리-동부리 지역과 일광택지개발지구가 분리되어 탐지된다. 따라서 50×50m 공간해상도의 경우 연구 지역 전체에서 발견되는 인구중심지는 모두 3개이다. 모든 공간해상도의 지도에서, 원자로 중심지로부터 반경 7.5km 내에 인구중심지의 영역이 포함되는 경우는 없다. 단지, 남부중심지의 경우 1×1km, 750×750m, 500×500m 공간해상도에서 7.5km에 상당히 근접하고 있어, 원자로의 위치를 단위 그리드 셀의 어느 부분에 위치시키느냐에 따라 판정 결과가 바뀔 여지를 남기고 있다.

이 기법과 관련하여 가장 중요한 사안은 최적의 공간해상도가 무엇이나는 것이다. 유사한 접근법을 사용한 한국원자력안전기술원의 보고서(KINS, 2008)을 보면, 대략 100×100m가 최적인 것으로 보고하고 있다. 그 이유로 해상도가 불필요하게 높아지면 인구밀도의 추정이 작은 인구에도 민감하게 이루어져 과대 추정이 발생할 수 있고, 너무 낮아지면 중요한 소규모의 인구중심지를 놓치게 될 수도 있다는 점

Table 2. Some Characteristics of Population Centers Detected by the Cell-Based Threshold Density Method. 셀-기반 임계밀도 기법에 의한 인구중심지의 특성

Spatial Resolution	Population Centers	Area(km ²)	Population (persons)	Population Density (persons/km ²)	Decision*
1×1km	West	12.0000	88,243	7,354	○
	South	24.0000	82,969	3,457	○
750×750m	West	10.6875	88,375	8,269	○
	South	20.8125	82,549	3,966	○
500×500m	West	8.5000	88,247	10,382	○
	South	15.7500	81,990	5,206	○
250×250m	West	6.5000	87,669	13,488	○
	South	8.1250	68,430	8,422	○
100×100m	West	5.3600	87,677	16,358	○
	South	6.0600	67,716	11,174	○
50×50m	West	4.9350	87,527	17,736	○
	South 1	2.7700	32,522	11,741	○
	South 2	2.1250	29,441	13,855	○

* ○ means “acceptable” in terms of the critical distance criterion

을 들고 있다. 본 연구는 공간해상도 선정의 자의성을 극복하기 위해 사용된 데이터, 특히 토지이용도의 특성에 기반하여 최적의 공간해상도를 선정하는 방식을 취했다. 즉, 토지이용도 상에서 인구가 실제 거주하는 주거지역은 서로 독립적으로 분리되어 분포하는 폴리곤으로 나타나 있는데, 셀의 해상도를 선택하기 위해 이 주거지역 폴리곤의 면적 분포를 참조하는 것이다. 총 1,590여건 중 면적이 1m^2 가 넘는 1,588건에 대해 면적 분포를 살펴본 결과, 최대 면적은 $4,044,239\text{m}^2$, 평균 면적은 $14,274\text{m}^2$, 최빈 면적은 $49,499\text{m}^2$ 으로 나타났다. 평균 면적과 최빈 면적을 동시에 고려할 때 본 사례지역의 경우 주거지역 폴리곤을 대변할 수 있는 셀의 크기는 $100 \times 100\text{m} \sim 250 \times 250\text{m}$ 가 적절한 것으로 판단되며, 이에 국한하여 다음의 구역-기반 임계밀도 기법에 의한 인구중심지 확인을 수행하였다.

(2) 구역-기반 임계밀도 기법에 의한 인구중심지 확인 및 입지기준 평가

전술한 바와 같이 셀 크기 $100 \times 100\text{m}$ 와 $250 \times 250\text{m}$ 의 두 경우에 대해 구역-기반 임계밀도 기법에 의한 인구중심지 파악을 시도하였다. 방법론에서 서술한 것처럼 개별 셀이 아니라 셀들의 공간적 연합체인 구역에 대해 임계밀도를 적절히 설정하는 것이 과제 되는데, 여기에서는 우리나라 동 수준의 인구밀도가 2010년 센서스를 기준으로 약 $3,800\text{명}/\text{km}^2$ 에 달한다는 것을 참조하여 $4,000\text{명}/\text{km}^2$ 을 기본적인 기준으로 하였다. 이렇게 하는 이유는 인구중심지는 도시적 특성이 현저하게 드러나는 구역이므로 통상적인 도시의 인구밀도를 구역 전체의 임계밀도로 설정하는 것이 타당하다고 보았기 때문이다. 하지만 임계밀도의 변화에 따라 파악되는 중심지가 어떻게 달라지는지 살펴보기 위해 $500\text{명}/\text{km}^2$, $8,000\text{명}/\text{km}^2$ 에 대해서도 함께 분석하였다. 임계밀도를 충족하는 셀 혹은 셀들의 연합체를 시작으로 구역의 임계밀도가 충족되는 한 연결한 셀들로 계속 확장해가며 구역의 범역을 탐색하는데, 인구밀도가 0인 셀은 포함되지 않도록 하였다. 이는 통계적 인구밀도 개념보다 지리적 인구밀도 개념이 본 연구에 더 적절한 것으로 판단

하였기 때문이다. 임계밀도를 충족하는 후보 구역에 대해 적용되는 2차 기준인 임계인구수는 셀-기반 방식과 동일하게 25,000명으로 유지하였다.

분석 결과는 Table 3과 Figure 4에 요약되어 있다. 먼저 우선적인 임계기준으로 삼은 $4,000\text{명}/\text{km}^2$ 을 대상으로 결과를 살펴보면, $250 \times 250\text{m}$ 해상도에 대해 인구중심지를 파악한 결과 중부와 남부의 두 중심지가 확인되었다(Figure 4(c)). 셀-기반 방식의 결과와 비교해보면 인구밀도가 $500\text{명}/\text{km}^2$ 이하의 셀들도 구역에 포함되면서 두 중심지 모두 셀-기반 방식에 비해 면적 및 인구가 증가하였고, 대신 인구밀도는 낮아졌다. 특히 중·서부에 위치한 중심지의 경우 셀-기반 방식에서 파악된 서부 중심지가 동쪽으로 크게 확장된 모습으로, 발전소로부터의 임계거리 영역과 상당부분이 중복되고 있다. 따라서 이 경우를 기준으로 한다면 제시된 발전소의 입지는 인구중심지에 너무 가까워 적절하지 못한 것으로 판단되었다. $100 \times 100\text{m}$ 해상도의 경우 셀-기반 방식의 결과와 비교해 본다면 파악된 두 개의 중심지 모두 면적 및 인구수가 다소 증가했을 뿐 대동소이한 결과가 나타났다(Figure 3(e)와 Figure 4(d) 비교).

구역의 임계밀도를 달리하여 $500\text{명}/\text{km}^2$ 및 $8,000\text{명}/\text{km}^2$ 에 대해 파악된 인구중심지를 살펴보면 다음과 같다. 우선 $250 \times 250\text{m}$ 해상도의 경우 임계밀도가 작을수록 면적과 인구수가 증가하는데, $500\text{명}/\text{km}^2$ 의 경우 북부에 중심지가 추가로 파악되었다. 모든 임계밀도에서 중·서부 중심지는 발전소와의 임계거리 영역과 상당 부분이 중복되면서 기준을 충족하지 못한 것으로 나타났다(Figure 4(a)와 (e)). 가장 보수적인 임계밀도를 적용한 경우에서조차 중·서부 중심지가 원자로부터의 임계거리 기준을 통과하지 못한 것이 가장 특징적인 결과이다. $100 \times 100\text{m}$ 해상도의 경우는 모든 임계밀도에서 동일한 결과가 나타났다(Figure 4(b)와 4(f)). 이것은 고해상도일 경우 인구밀도가 0인 셀이 분명하게 드러나게 되고, 그 셀들이 중심지의 범역을 탐색하는 과정에서 근접한 인구거주셀로 확장할 수 없도록 억제함으로써 중심지의 분포가 고착되기 때문으로 판단된다. 고해상도가 되면 거주지역의 분포를 보다 정확하게 반영할 수는 있겠지

Table 3. Some Characteristics of Population Centers Detected by the Area-Based Threshold Density Method.
구역-기반 임계밀도 기법에 의한 인구중심지의 특성

Threshold Density (persons/km ²)	Spatial Resolution	Population Centers	Area(km ²)	Population (persons)	Population Density (persons/km ²)	Decision*
500	250×250m	North	13.2500	39,790	3,003	○
		Midwest	16.6875	93,182	5,584	×
		South	17.3750	85,373	4,914	○
	100×100m	West	5.9000	87,830	14,886	○
		South	7.0600	69,535	9,849	○
4,000	250×250m	Midwest	16.6875	93,182	5,584	×
		South	17.3750	85,373	4,914	○
		West	5.9000	87,830	14,886	○
	100×100m	South	7.0600	69,535	9,849	○
		West	5.9000	87,830	14,886	○
8,000	250×250m	Midwest	11.1875	89,671	8,015	×
		South	8.5625	68,636	8,016	○
		West	5.9000	87,830	14,886	○
	100×100m	South	7.0600	69,535	9,849	○
		West	5.9000	87,830	14,886	○

* ○ means “acceptable” and × means “unacceptable” in terms of the critical distance criterion

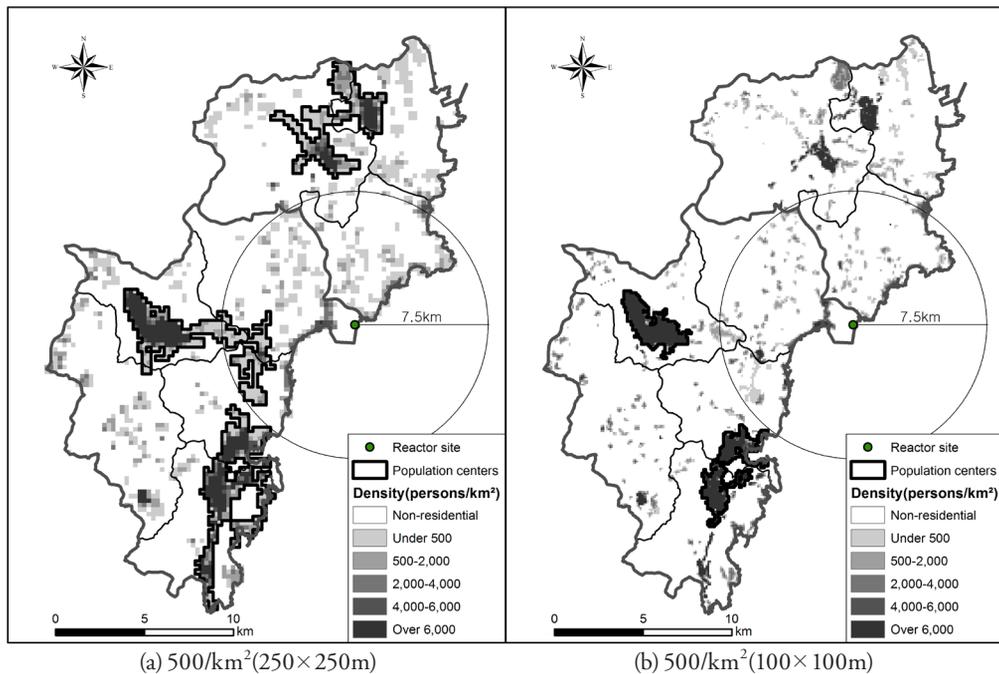


Figure 4. Detection of Population Centers Based on the Area-Based Threshold Density Method.
구역-기반 임계밀도 기법에 의한 인구중심지의 확인(계속)

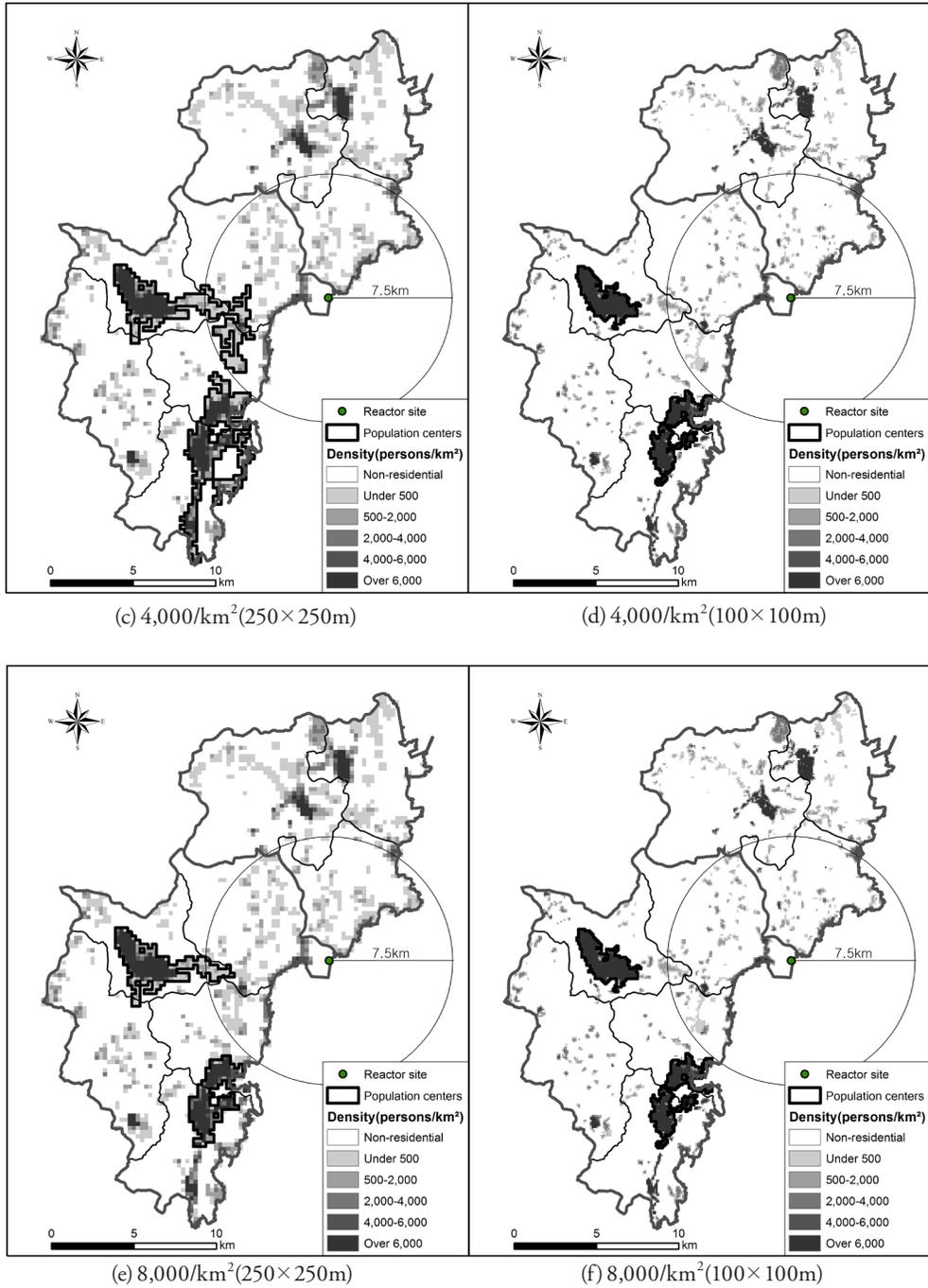


Figure 4. Detection of Population Centers Based on the Area-Based Threshold Density Method.
 구역-기반 임계밀도 기법에 의한 인구중심지의 확인

만, 인구밀도가 0인 셀로 인해 둘 이상의 후보 중심지가 매우 근접함에도 불구하고 서로 분리되는 것으로 파악되어 인구규모의 제약에 의해 최종 중심지로 판단되지 못할 가능성이 높다.

5. 요약 및 결론

본 논문의 주된 연구목적은 비선호 시설, 특히 원자력 발전소의 인구분포 관련 입지기준 평가를 위한 GIS-기반 방법론을 제안하는 것이었다. 이 연구 목적을 달성하기 위해 우선 IAEA, 미국의 NRC, 그리고 우리나라의 한국원자력안전기술원을 포함한 여타 국가들이 제시하고 있는 입지기준에 대한 리뷰를 시행하였다. 이 결과 GIS-기반 방법론이 해결해야 할 두 가지 세부 과제가 확인되었는데, 하나는 인구분포에 대한 정밀한 재현이고, 또 다른 하나는 인구중심지의 확인이었다. 본 연구는 전자에 대해 DAI 기법을 제시하였으며, 후자에 대해 셀-기반 임계밀도 기법과 구역-기반 임계밀도 기법을 제시하였다. 이 기법들을 우리나라 고리 원전 1호기의 경우에 적용하여 제안된 방법론의 유용성을 검토하였다.

인구 수를 속성값으로 가지고 있는 행정경계 데이터와 보조 정보인 토지이용 데이터를 결합한 대시메트릭 매핑을 통해 보다 세밀한 인구분포에 대한 정보가 도출되는데, 이 결과를 에어리얼 인터플레이션을 이용해 특정한 크기의 그리드 폴리곤으로 전환하면 DAI 기법을 통한 인구분포에 대한 재현이 완수된다. 인구중심지를 확인하기 위한 셀-기반 임계밀도 기법은 특정한 임계밀도보다 더 높은 인구밀도를 보이는 셀을 우선적으로 선택한 후 변을 접하는 셀들을 함의함으로써 인구중심지를 확인하는 방식이다. 이에 반해 구역-기반 임계밀도 기법은 반복적인 셀 선택과 함의 과정을 통해 주어진 임계밀도값을 충족시키는 구역을 생성하고, 임계인구수 기준을 적용하여 최종적으로 인구중심지를 확인하는 방식이다. 두 기법은 대조적인 장단점을 가지고 있으며, 입지기준 평가에서 상호보완적으로 사용될 수 있다.

고리 원전 1호기에 대한 사례 분석을 위해 해당 지역에 DAI를 적용한 결과 6개의 서로 다른 공간해상도를 갖는 인구밀도 격자망이 도출되었다. 여러 가지를 고려한 결과 100×100m 혹은 250×250m가 최적의 해상도인 것으로 판단되었다. 그리드 셀에 표현된 인구분포에 두 가지 인구중심지 확인 기법을 적용하였다. 셀-기반 임계밀도 기법의 경우 약 80,000명 규모의 서부 중심지와 남부 중심지가 도출되었고, 원전으로부터 7.5km 반경 내에는 어느 인구중심지도 포함되지 않는 것으로 확인되었다. 구역-기반 임계밀도 기법의 경우는 다소 다른 결과가 도출되었는데, 서부 중심지가 동쪽으로 확장된 형태의 중·서부 중심지가 확인되었으며, 이 중심지는 임계거리 내부에 위치하는 것으로 파악되었다. 이 상반된 결과는 입지기준 평가의 결과가 평가 기법에 의존적임을 명백히 보여주는 것으로, 입지평가의 실행적 측면에서 시사하는 바가 크다. 결론적으로 말해, 원자력 발전소의 입지기준 평가를 위한 완벽하게 객관적인 방법론은 존재하지 않으며, 평가 결과는 인구분포의 재현과 인구중심지의 확인을 위한 기법의 선정과 최적의 공간해상도, 임계밀도, 임계인구수, 임계거리와 같은 파라미터의 결정에 의존적일 수밖에 없다.

본 연구는 기본적으로 지리공간분석 및 모델링 분야(Lee and Kim, 2012)에서 개발된 기법(DAI와 클러스터 탐지)을 입지 평가에 적용해보려는 시도이다. 원자력 발전소와 같은 비선호 시설의 다기준 평가에 있어 인구분포가 차지하는 비중은 매우 높다. 그럼에도 불구하고 인구분포 관련 입지평가 기준에는 불명확한 점이 많고, 그 기준의 부합 여부를 실행할 평가 방법에는 정교하지 못한 측면이 많다. 이러한 한계를 극복하는데 지리공간분석 및 모델링 분야에서 개발된 분석 기법이 많은 기여를 할 수 있다고 본다. 본 연구는 그러한 시도의 한 예일 수 있으며, GIS-기반 입지기준 평가 방법론 개발의 중요성을 환기시키는데 기여할 수 있기를 기대한다.

참고문헌

- AERB (Atomic Energy Regulatory Board), 1990, Code of Practice on Safety in Nuclear Power Plant Siting, AERB/SC/S, Mumbai, India.
- AERB (Atomic Energy Regulatory Board), 1998, Population Distribution and Analysis in Relation to Siting of Nuclear Power Plants, AERB/SG/S-9, Mumbai, India.
- Aldstadt, J. and Getis, A., 2006, Using AMOEBA to create a spatial weights matrix and identify spatial clusters, *Geographical Analysis*, 38(4), 327-343.
- Baban, S. M. J. and Flannagan, J., 1998, Developing and implementing GIS-assisted constraints criteria for planning landfills sites in the UK, *Planning Practice & Research*, 13(2), 139-151.
- Carver, S. J., 1991, Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems, *International Journal of Geographical Information Systems*, 5(3), 321-339.
- Duque, J. C., Aldstadt, J., Velasquez, E., Franco, J. L., and Betancourt, A., 2011, A computationally efficient method for delineating irregularly shaped spatial clusters, *Journal of Geographical Systems*, 13(4), 355-372.
- Durfee, R. C. and Coleman, P. R., 1983, Population Distribution Analyses for Nuclear Power Plant Siting, NUREG/CR-3056, ORNL/CSD/TM-197, Oak Ridge National Laboratories, Oak Ridge.
- Eastman, J. R., 1999, Multi-criteria evaluation and GIS, in Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., and Rhind, D. W., eds., *Geographical Information Systems, Vol.1: Principles and Technical Issues*, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, 493-502.
- Eicher, C. L. and Brewer, C. A., 2001, Dasymetric mapping and areal interpolation: Implementation and evaluation, *Cartography and Geographic Information Science*, 28(2), 125-138.
- Emek, E. and Kara, B. Y., 2007, Hazardous waste management problem: The case for incineration, *Computers & Operations Research*, 34(5), 1424-1441.
- Erkut, E. and Moran, S. R., 1991, Locating obnoxious facilities in the public sector: An application of the analytic hierarchy process to municipal landfill siting decisions, *Socio-Economic Planning Sciences*, 25(2), 89-102.
- Erkut, E. and Neuman, S., 1989, Analytical models for locating undesirable facilities, *European Journal of Operational Research*, 40(3), 275-291.
- Farhan, B. and Murray, A. T., 2006, Distance decay and coverage in facility location planning, *The Annals of Regional Science*, 40(2), 279-295.
- Fatta, D., Saravanos, P., and Loizidou, M., 1998, Industrial waste facility site selection using geographical information system techniques, *International Journal of Environmental Studies*, 56(1), 1-14.
- Ferretti, V., 2011, A multicriteria spatial decision support system development for siting a landfill in the province of Torino (Italy), *Journal of Multi-criteria Decision Analysis*, 18(5/6), 231-252.
- Flowerdew, R. and Green, M., 1992, Developments in areal interpolation methods and GIS, *Annals of Regional Science*, 26(1), 67-78.
- Flowerdew, R. and Green, M., 1994, Areal interpolation and types of data, in Fotheringham, A. S. and Rogerson, P. A., eds., *Spatial Analysis and GIS*, Taylor & Francis, London, 121-145.
- Gómez-Delgado, M. and Tarantola, S., 2006, GLOBAL sensitivity analysis, GIS and multi-criteria evaluation for a sustainable planning of a hazardous waste disposal site in Spain, *International Journal of Geographical Information Science*, 20(4), 449-466.
- Goodchild, M. F. and Lam, N. S.-N., 1980, Areal interpolation: A variant of the traditional spatial problem, *Geoprocessing*, 1, 297-312.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 1978, Safety in Nuclear Power Plant Siting, IAEA Code of Practice, No.50-C-S, Vienna.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 1980, Site Selection and Evaluation for Nuclear Power Plants with Respect to Population Distribution, IAEA Safety Guides, No.50-SG-S4, Vienna.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 2002, Dis-

- persion of Radioactive Material in Air and Water and Consideration of Population Distribution in Site Evaluation for Nuclear Power Plants, Safety Guide, IAEA Safety Standards Series, No. NS-G-3.2, IAEA, Vienna.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 2003, Site Evaluation for Nuclear Installations, Safety Requirements, IAEA Safety Standards Series, No. NS-R-3, IAEA, Vienna.
- Kim, H. and Choi, J., 2011, A hybrid dasymetric mapping for population density surface using remote sensing data, *Journal of the Korean Geographical Society*, 46(1), 167-180.
- KINS (Korea Institute of Nuclear Safety), 2008, Development of Regulatory Guide: Population Center, KINS/RR-641, KINS, Daejeon (in Korean).
- KINS (Korea Institute of Nuclear Safety), 2011a, Regulatory System and Guide for Nuclear Power Plants: Regulatory System, KINS/RS, KINS, Daejeon (in Korean).
- KINS (Korea Institute of Nuclear Safety), 2011b, Regulatory System and Guide for Nuclear Power Plants: Regulatory Guide (I), KINS/RG, KINS, Daejeon (in Korean).
- Kirkwood, C. W., 1985, A case history of nuclear power plant site selection, *Journal of the Operational Research Society*, 33(4), 353-363.
- Langford, M., 2007, Rapid facilitation of dasymetric-based population interpolation by means of raster pixel maps, *Computers, Environment and Urban Systems*, 31(1), 19-32.
- Lee, S.-I. and Kim, K., 2007, Representing the population density distribution of Seoul using dasymetric mapping techniques in a GIS environment, *Journal of the Korean Cartographic Association*, 7(2), 53-67 (in Korean).
- Lee, S.-I. and Kim, K., 2012, Geospatial analysis and modeling in Korea: A literature review, *Journal of the Korean Geographical Society*, 47(4), 606-624.
- Lee, S.-I., Cho, D., Sohn, H., and Chae, M., 2010, A GIS-based method for delineating spatial clusters: A modified AMOEBA technique, *Journal of the Korean Geographical Society*, 45(4), 502-520 (in Korean).
- Macintosh, A., 2007, Siting Nuclear Power Plants in Australia: Where Would They Go? Research Paper No. 40, Australia Institute.
- Malczewski, J., 1999, *GIS and Multicriteria Decision Analysis*, John Wiley & Sons, New York.
- Malczewski, J., 2004, GIS-based land-use suitability analysis: A critical overview, *Progress in Planning*, 62(1), 3-65.
- Malczewski, J., 2006, GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature, *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703-726.
- Melachrinoudis, E. and Cullinane, T. P., 1985, Locating an undesirable facility within a geographical region using the MAXIMIN criterion, *Journal of Regional Science*, 25(1), 115-127.
- Mennis, J. and Hultgren, T., 2006, Intelligent dasymetric mapping and its application to areal interpolation, *Cartography and Geographic Information Science*, 33(3), 179-194.
- MEST (Ministry of Education, Science and Technology), 2011, Technological Criteria Notice for Nuclear Reactor Siting, Notification No. 2011-03, MEST, Seoul (in Korean).
- Nyerges, T. L. and Jankowski, P., 2010, *Regional and Urban GIS: A Decision Support Approach*, The Guilford Press, New York.
- Openshaw, S., 1986, *Nuclear Power: Siting & Safety*, Routledge & Kegan Paul, Boston, MA.
- Plastria, F. and Carrizosa, E., 1999, Undesirable facility location with minimal covering objectives, *European Journal of Operational Research*, 119(1), 158-180.
- Reibel, M., 2007, Geographic information systems and spatial data processing in demography: A review, *Population Research & Policy Review*, 26(5/6), 601-618.
- Reibel, M. and Agrawal, A., 2007, Areal interpolation of population counts using pre-classified land cover data, *Population Research & Policy Review*,

- 26(5/6), 619-633.
- Roshan, A. D., Shylamoni, P., and Acharya, S., Monograph on Siting of Nuclear Power Plant, AERB (Atomic Energy Regulatory Board), Mumbai, India. Available at: <http://www.aerb.gov.in/t/sj/Siting.pdf> (Accessed September 17, 2012).
- Snyder, J. P., 1987, *Map Projections: A Working Manual*, U.S. Geological Survey Professional Paper 1395, United States Government Printing Office, Washington, DC.
- Snyder, J. P. and Voxland, P. M., 1989, *An Album of Map Projections*, U.S. Geological Survey Professional Paper 1453, United States Government Printing Office, Washington DC.
- Sugumaran, R. and DeGroote, J., 2011, *Spatial Decision Support Systems: Principles and Practices*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- U.S. NRC (Nuclear Regulatory Commission), 1979, *Demographic Statistics Pertaining to Nuclear Power Reactor Sites*, National Technical Information Service, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Springfield, VA.
- U.S. NRC (Nuclear Regulatory Commission), 1998, *General Site Suitability Criteria for Nuclear Power Stations*, Regulatory Guide 4.7.
- U.S. NRC (Nuclear Regulatory Commission), 2007, *Standard Review Plan: 2.1.3 Population Distribution*, NUREG-0800, U.S. NRC .
- U.S. NRC (Nuclear Regulatory Commission), 2012, *NRC Regulations 10 CFR Part 100-Reactor Site Criteria*.
- 교신: 이상일, 151-748, 서울특별시 관악구 관악로 1, 서울대학교 사범대학 지리교육과(이메일: si_lee@snu.ac.kr, 전화: 02-880-9028)
- Correspondence: Sang-II Lee, Department of Geography Education, College of Education, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-748, Korea (e-mail: si_lee@snu.ac.kr, phone: +82-2-880-9028)

최초투고일 2012.10.11

수정일 2012.10.27

최종접수일 2012.10.29