

퍼지기반 공간통합에 의한 제주도의 지열 부존 잠재력 탐사

백승균 · 박맹언

부경대학교 환경지질과학과

Geothermal Potential Mapping in Jeju Island Using Fuzzy Logic Based Data Integration

Seung-Gyun Baek and Maeng-Eon Park

Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University

Abstract : A fuzzy logic based data integration was applied for geothermal potential mapping in Jeju Island. Several data sets, such as geological map, the density of drainage system, the distribution density of cinder cones, density of lineaments, aerial survey map for total magnetic intensity and total gamma ray, were collected as thematic map for the integration. Fuzzy membership function for all thematic maps were compared to the locations of the spa, which were used as ground-truth control points. The older geology, the lower density of drainage, cinder cones and lineaments, and the lower intensity of magnetic and gamma ray were showed the higher fuzzy membership function values, respectively. After integrating all thematic maps, the results of gamma operator with the gamma value of 0.75 was the highest success rate, and new geothermal potential zone is prospected in western north part of Jeju Island.

Key Words : Jeju Island, Geothermal Potential Mapping, Fuzzy Logic, Data Integration, Fuzzy Membership Function.

요약 : 제주도의 지열 부존 가능지역을 추출하기 위하여 최근 활발하게 제안되고 있는 퍼지이론에 기반한 GIS 통합기법을 적용함으로써 그 효용성을 검토하였다. 지질도, 수계 분포 밀도, 분석구 분포 밀도, 선구조 분포 밀도, 항공자력도, 항공방사능도 등 각 주제도의 통계적 상관관계 분석을 위해 퍼지소속함수(Fuzzy membership function)를 그래프에 도시하였다. 현재 온천 발견 위치와 상관성은 용암류의 분출시기가 오래될수록 높았다. 수계, 분석구 및 선구조에서는 분포밀도가 낮은 곳에서 상관성이 높게 나타났으며, 항공자력도와 항공방사능도에서는 대자율 및 감마선 강도가 중간 범위인 곳에서 상관성이 높은 것으로 나타났다. 퍼지 연산자 중에서는 γ 연산자($\gamma=0.75$)가 가장 높은 성공 비율을 보였으며, 제주도 서북부 일부지역에서 새로운 지열 부존 가능성이 제기되었다.

1. 서론

제주도는 화산활동에 의해 형성된 화산섬으로서 남한에서 제4기 화산암이 가장 광범위하게 분포한다. 초기 분출암은 주로 현무암에서 조면암질 조성의 용암류로 구성되어 있으며, 후기는 열극분출(fissure eruption)에 의한 용암분출과 분석구(cinder cone)들이 형성되었다. 역사시대에도 화산활동 기록이 있는 것으로 미루어 볼 때, 아직도 심부에는 열원이 존재할 가능성을 시사하고 있다(김현국, 1994).

제주도에서는 태양열, 풍력, 지열자원 등 환경친화적이고 미래지향적 청정에너지 활용에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 제주도의 지열자원에 대해서는 1970년대 말 석유파동 이후 관심이 높아졌고, 1980년대 말부터 제주도 동부 지역 여러 곳에 온천공 굴착이 시작되었으며, 1993년에는 한국자원연구소에서 지표지질 조사, 항공물리탐사, 지화학 탐사, 심부 시추 및 물리탐사 등에 의한 지열자원 탐사를 수행하였다(통상산업부, 1996). 최근에는 호텔, 골프장, 대단위 테마공원 등 다양한 위락시설의 건설이 활발해지면서 지열자원, 특히 온천 개발에 대한 기대가 어느 때보다 커지고 있다.

각종 지질자료들은 위치정보와 함께 분석되어야 하는 점에서 대용량 정보의 수집, 저장, 분석 및 관리 등에 효과적인 GIS의 중요성이 점차 증대되고 있다(Aronoff, 1989; Burrough and Macdowell, 1998). 최근에는 지질정보와 같이 엄격한 경계설정이 어렵거나 불확실한 정보를 효율적으로 다룰 수 있는 퍼지이론(fuzzy theory)을 도입한 통합 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 광물자원 탐사나 산사태 취약성 분석 등 적용 범위가 넓어지고 있다(Lee et al., 1995; Moon, 1998; Choi et al., 2000; 박노옥 등, 2003).

따라서 이 연구에서는 제주도의 지열수 부존가능지역을 추출하기 위하여 최근 활발하게 적용되고 있는 퍼지이론을 이용한 GIS 통합기법을 적용하였다. 이를 위해 지질도, 항공물리탐사 자료,

분석구 분포 밀도 및 선구조 밀도 자료 등을 이용하여 지질정보 사이의 통계적 관계를 이용한 GIS 통합기법을 적용하였다. 또한 분석구는 최근까지 화산활동이 있었던 곳으로 지열 잔존 가능성이 가장 높은 지역이므로 이들의 분포 밀도와 이들을 서로 연결하는 선구조도를 작성하여 온천 발견 위치 및 저온지열수 지점과의 상관성을 분석하였다.

2. 지질 환경

제주도는 주로 신생대 제3기말 플라이오세로부터 제4기 플라이스토세에 걸쳐 일어난 화산활동에 의하여 분출된 알칼리화산암인 현무암질 용암류로 구성되어 있으며, 국부적으로 화산성 쇄설암(volcaniclastic rock)이 분포되어 있다(윤선 등, 1995). 주요 구성암석은 역암, 용암분출에 의해 형성된 화산암, 화산 폭발에 의해 형성된 화산쇄설암이다. 역암은 용암과 용암 사이에 협재한 황적색 또는 회색의 니질퇴적암, 역암, 함각력 역암으로 구성되어 있다. 화산암은 현무암, 조면현무암, 현무암질조면안산암, 조면안산암 및 조면암류로 분류되는데, 일부 조면암류는 관입상의 특징을 나타낸다. 현무암은 분출 당시에 점성이 낮아 넓은 지역을 피복하여 평활한 지형을 이루며, 주로 제주도 동측과 서측에 분포한다. 화산쇄설암은 수성화산활동(hydrovolcanism)과 스트롬볼리형 분출(Strombolian type eruption)에 의해 형성된 것으로 구분된다. 수성화산활동에 의해 형성된 유리질쇄설암은 주로 해안에 분포하고, 스트롬볼리형 분출과 관련된 화산쇄설암은 분석구를 형성하고 있다(한국자원연구소, 2000) (Fig. 1).

제주도 동부지역의 기저에는 두께가 120m에 이르는 용암류와 그 하부에 약 120m 두께의 미고결퇴적층이 분포한다. 서부 지역은 용암류의 두께가 50 내지 70m이고, 하부에 서귀포층 및 미고결퇴적층이 분포하는 것으로 알려져 있다(고기원, 1997). 미고결퇴적층 하부에는 중생대 기반암층으로 해석되는 용결응회암, 화강암 등이 분포한다(윤상규

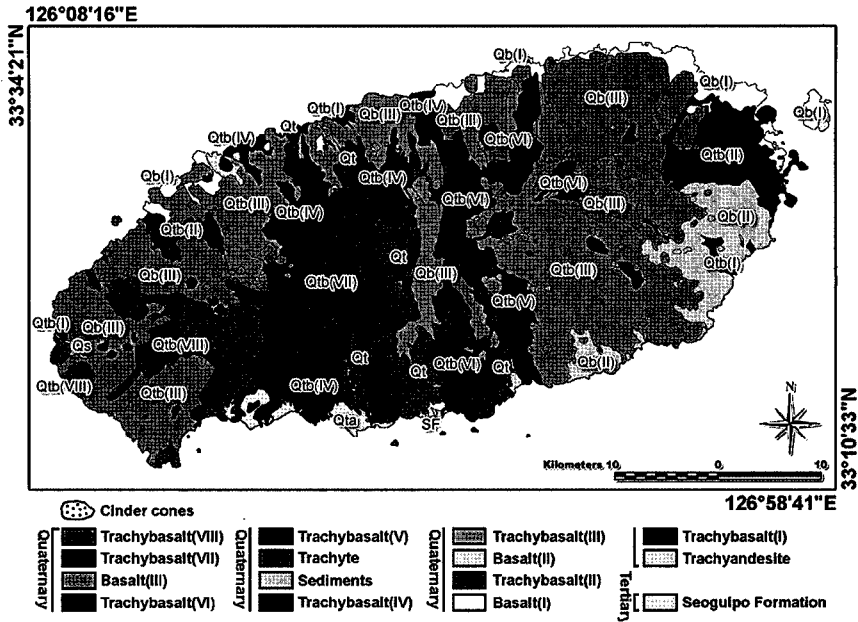


Fig. 1. Geological map of the study area (KIGAM, 2000).

등, 1984; 고기원, 1991, 박준범 등, 1991).

제주도는 형성시기가 젊고 용암류의 투수성이 높으므로 지하에 지하수를 저류할 수 있는 구조가 많은 것으로 알려져 있다. 용암류에 있어 투수성을 높여주는 요인으로는 용암류에 수반되는 크링커층, 용암류 사이의 접촉면, 절리, 용암관, 용암터널, 분석, 대형암괴, 공극, 기공, 붕괴에 의해 형성되는 공동 등이 있다(제주도, 한국수자원공사, 2003).

제주도의 지열 부존 가능성은 2가지로 예상할 수 있는데, 첫 번째는 분석구가 지하 심부 마그마의 이동통로 역할을 하므로 그 하부에 지열 이상대가 잔존하는 경우이며, 두 번째는 심부의 화강암류에 기원한 지열이 지질구조선을 따라 천부까지 올라오는 경우이다(통상산업부, 1996). 그러나 어느 경우이든지 지열수의 순환을 가능하게 하는 지질학적 구조가 필요하다.

3. 주제도의 구성

제주도의 지열 부존 잠재력 탐사를 위한 GIS

Table 1. Data units and classes of each data sets.

| Data sets | Data Units | | | Classes |
|-------------------------------|------------|--------|----------|---------|
| | Min. | Max. | Interval | |
| Geological map | - | - | - | 15 |
| Density of drainage | 0.0 | 3.0 | 0.2 | 15 |
| Density of cinder cones | 0.0 | 8.0 | - | - |
| Density of lineaments | 0.0 | 2.6 | 0.2 | 13 |
| Total magnetic intensity (nT) | 47,200 | 50,400 | - | - |
| Total gamma ray (K) | 0 | 500 | - | - |

공간통합 기법의 적용에 사용된 공간자료로는 (1) 지질도, (2) 수계 분포 밀도도, (3) 분석구 분포 밀도도, (4) 선구조 분포 밀도도, (5) 항공 전자력도, (5) 항공 전방사능도 등이다. 공간자료의 격자 크기는 40m이며, 1950×1108 화소의 GIS 데이터베이스로 구축하였다(Table 1).

기준입력자료(ground truth control point)는 '제주도 온천자원 조사보고서(한국자원연구소, 1992)'와 현재 운영 중인 골프장의 온천수 자료 등으로부터 13개 지점에 대한 지리좌표를 획득하였다(Fig. 2). 제주도의 지하수는 지역과 계절에

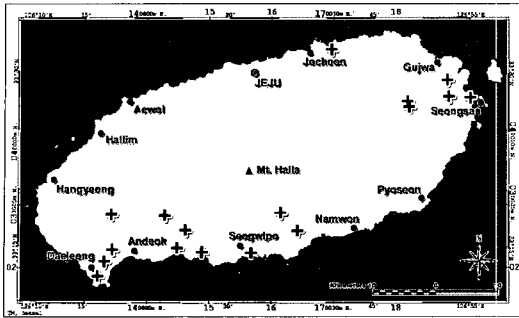


Fig. 2. Locations of spa and low geothermal water in Jeju Island.

따라 차이가 있으나 평균 16°C로써, 20°C 이상의 지하수는 저온의 지열수로 간주할 수 있으므로 “제주도 지하수 보전·관리계획 보고서”(제주도, 2000)로부터 5개 지하수 관측공의 지리좌표를 추가하였다.

1) 지질도

제주도의 상세한 지질도(1:50,000)는 작성시기에 따라 암석분류체계가 다르고 지질경계가 일치되지 않으며, 특히 공간해상도 40m의 입력자료로 표현하기에는 암석 분류가 방대하고 복잡하다. 따라서 암석 조성과 화산분출 시기에 따라 암석명과 분포지역이 표시되어 있는 1:250,000 지질도(한국자원연구소, 2000)를 이용하여 주제도를 작성하였다. 이 때 분출 시기와 구성 암석에 따라 하부로부터 서귀포층, 조면안산암, 조면현무암(I), 현무암(I), 조면현무암(II), 현무암(II), 조면현무암(III), 조면현무암(IV), 퇴적암, 조면암, 조면현무암(V), 조면현무암(VI), 현무암(III), 조면현무암(VII), 조면현무암(VIII) 순으로 하여 총 15 클래스(class)로 구분하여 범주형 자료(thematic data)로 작성하였다(Fig. 3a).

암상별 분포특징을 살펴보면 초기에 분출한 조면안산암, 조면현무암(I), 현무암(I) 등은 제주도 남부, 북부 및 동북부 해안가에 주로 분포, 후기에 분출된 화산암에 피복되어 있다. 이후 분출한 현무암(II), 조면현무암(III)은 남서부에 주로 분포하고, 북서부와 동부 중앙에 넓게 분출한 조면현무암(III)에 의해 피복되어 있다. 이어서 분출한 조면

현무암(IV), 조면암, 조면현무암(V)와 조면현무암(VI)은 제주도 남북부에 산점상으로 분포한다. 현무암(III)은 한라산 정상에서 남북으로 분포하고, 동북부와 서부에도 넓게 분포하고 있다. 가장 후기의 조면현무암(VII), 조면현무암(VIII)은 서부중앙에 주로 분포한다.

2) 수계 분포밀도

제주도의 남·북사면은 지형경사가 급하여 수계의 발달이 양호하나 동·서 사면은 용암대지의 발달로 경사가 완만하여 수계의 발달이 빈약한 편이다. 제주도의 하천은 여름철의 집중호우를 제외하고는 물이 흐르지 않는 건천으로, 투수성이 강한 화산암의 분포로 인해 지하수로의 함양이 용이하다. 수계의 발달이 빈약한 동부 지역의 경우 지하수 함양율이 매우 높은 것으로 보고되었으며(제주도, 한국수자원공사, 2003), 이러한 지역은 빠른 지하수 유입으로 인한 지열의 냉각이 수반될 가능성이 높다.

주제도 작성을 위하여 수치지도(1:5,000)로부터 하천 레이어(layer)를 추출한 후 하천의 영향 반경(buffer)을 1km로 하여 수계 분포 밀도도를 작성하였다(Fig. 3b). 계산된 밀도는 0~3.0 범위를 나타내어 0.2 간격으로 하여 15 클래스로 재분류하여 범주형 자료로 작성하였다. 작성 결과 제주도 북부와 남부 지역의 밀도가 높고, 동부와 서부 지역이 낮게 나타났다.

3) 분석구 분포밀도

제주도 중앙부에는 1,950m 높이의 한라산이 위치하고, 그 주변에 360여 개의 분석구(cinder cone, 오름)들이 분포한다. 분석구는 지하심부의 마그마가 상대적으로 천부까지 발달하여 지표로 분출하는 통로로서 현재까지도 지열 이상대가 잔존할 수 있는 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 분석구의 공간적인 분포는 지열자원 탐사의 중요한 요인이 될 수 있으므로, GIS 공간통합을 위한 주제도로 선정하였다.

분석구의 정밀한 위치정보를 획득하기 위해 수

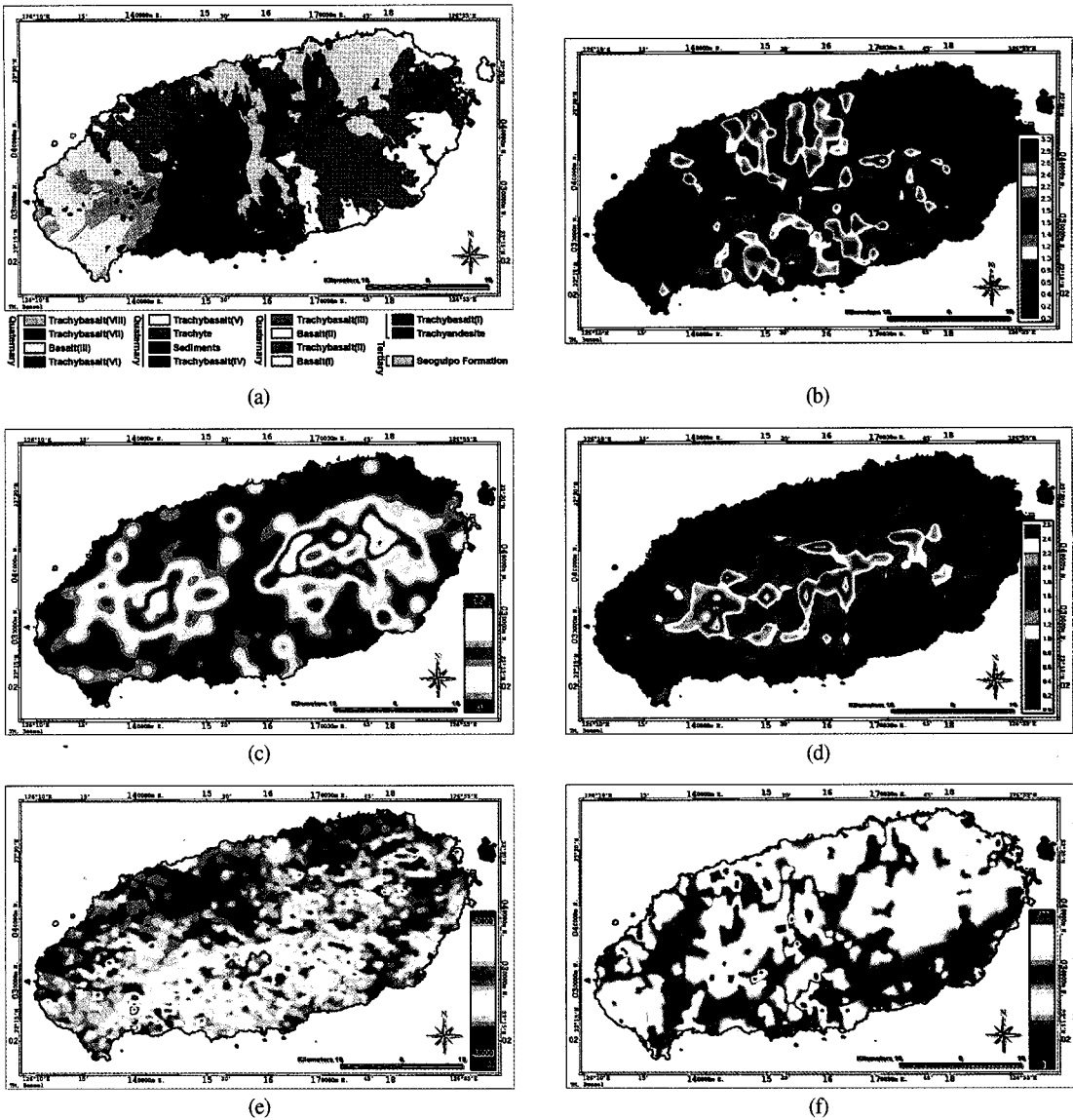


Fig. 3. Thematic maps for fuzzy logic based data integration. (a) geological map, (b) density of drainage system, (c) density of cinder cones, (d) density of lineaments, (e) aerial survey map for total magnetic intensity and (f) total gamma ray.

치지도(1:5,000)로부터 5m 격자의 음영기복도를 작성하여 분석구의 중심 좌표와 직경을 판독하였다. 획득된 좌표로부터 ArcView GIS 프로그램을 이용하여 분포 밀도도를 작성하였다. 분석구들은 지하심부에서 인접한 분석구들과 연관성을 가질 것이므로, 분포밀도가 군집화되는 최소거리를 고려하여 밀도계산을 위한 검색 반경(search radius)을 3000m으로 입력하였다. 계산된 밀도는 0~16 범위를 나

타내었으며, 정보손실을 최소화하기 위하여 연속형 자료(continuous data)로 작성하였다. 완성된 분석구 분포 밀도도에서는 서부 중앙부보다 동부 중앙부의 밀도가 높으며 범위도 더 넓은 것을 알 수 있다(Fig. 3c).

4) 선구조 분포밀도

분석구(cinder cone)는 광역적인 지구조 운동에

의해 형성된 열극(fissure)을 따라 발달하므로, 제주도에 형성되어 있는 분석구들도 공간적으로 단열(또는 단층)과 관련되어 분출한 것으로 추정된다. 열극 분출은 시기를 같이하는 분석구에서 선상 배열을 보이므로, 이들을 연결하는 선구조를 추정함으로써 제주도의 지질구조와 관련된 지열 부존 가능성을 파악하였다.

추정 선구조는 한국자원연구소(2000)에서 발행한 1:250,000 제주도 지질보고서를 이용하여, 총 78개의 선구조를 추출하였으며, 주 선구조군은 N50~80°E로서 제주도의 장축방향과 일치하였다. 추정 선구조의 분포밀도도는 분석구의 규모와 선구조의 영향 반경(buffer)을 입력하여 작성하였다(Fig. 3d).

계산된 밀도는 0~2.6 범위를 나타내어 0.2 간격으로 하여 13 클래스로 재분류하여 범주형 자료로 작성하였다. 완성된 선구조 분포밀도도에서는 한라산 정상부근의 제주도 중앙부와 서부 중앙의 밀도가 가장 높게 나타났으며, 동부 중앙은 이보다 낮았고, 남서 해안지역보다는 북동 해안 지역의 밀도가 더 낮았다.

5) 항공자력도

자력탐사는 대자율과 지자기장의 곱으로 표현되는 자화강도를 측정함으로써 자기이상체를 탐지하거나 지하 구조를 추정하는 방법이다. 분해능이 상대적으로 낮으나 탐사 깊이가 깊고 탐사 작업이 신속·저렴하며, 특히 항공이나 해상 탐사가 가능하기 때문에 지하자원 탐사와 지구구조 연구를 위한 광역 또는 개략 탐사에 주로 이용되어 왔다. 일반적으로 기반암의 대자율이 크고, 미고결층, 충적층, 파쇄대에서는 대자율이 낮아진다.

이 연구에서는 항공자력탐사 자료를 이용하여 제주도의 화산분출 및 분석구의 화산활동과 관련된 지질구조를 추정함으로써 지열 부존 가능성 및 온천과의 상관관계를 파악하고자 하였다. 이를 위해 한국동력자원연구소(1986)에서 발행한 1:50,000 축척의 항공자력도를 수치입력(digitizing)하고 이를 래스터데이터로 변환하여 주제도를 작성하였다

(Fig. 3e). 이 때 주제도에서의 대자율이 47,200~50,400 nT의 범위를 나타내었고, 정보손실을 최소화하기 위하여 연속형 자료로 작성하였다. 작성 결과 한라산 남쪽의 고산지대에서 대자율이 가장 높게 나타났으며, 제주도 북부와 동부의 해안 저지대의 대자율이 가장 낮으며, 산점상 또는 선적인 분포 특징을 보인다.

6) 항공방사능도

지하암반의 자연 지열류량은 그 지역 지하심도에 따른 지온상승율과 암반의 구성광물에 함유된 자연방사성원소의 붕괴에 의한 것으로 알려져 있다. 지열수의 탐사를 위해서는 지역별 방사성동위원소의 함량과 지열발생도 측정 또는 자연방사능의 분포에 대한 자료의 해석이 필요하다. 감마선을 방출하는 핵종(비스무스, 탈륨, 칼륨)은 단층이나 열극부에 농집되므로 지표에 노출된 균열이 지하심부로 연장되는 곳에서의 감마선 강도가 높아진다.

이 연구에서는 항공방사능탐사 자료를 이용하여 제주도 화산활동에 관련된 지질구조를 추정함으로써 지열 부존 가능성 및 온천과의 상관관계를 파악하고자 하였다. 이를 위해 한국동력자원연구소(1986)에서 발행한 1:50,000 축척의 항공 전방사능도를 수치입력하고 이를 래스터데이터로 변환하여 주제도를 작성하였다(Fig. 3f). 이 때 감마선 강도가 0~500 K의 범위를 나타내었고, 정보손실을 최소화하기 위하여 연속형 자료로 작성하였다. 작성 결과 제주도 북부 해안, 한라산 일대, 남부와 서부 해안가의 감마선 강도가 가장 높고, 산점상의 분포 특징을 나타내었다. 감마선 강도가 가장 낮은 지역은 한라산 서북부의 중산간지대이고, 한라산 주변에 산점상으로 분포하기도 한다.

4. 공간통합의 적용

1) GIS 공간통합 방법

지질자료와 같이 엄격한 경계설정이 어렵거나

불확실한 정보를 효율적으로 다룰 수 있는 퍼지이론을 도입한 GIS 공간통합기법 적용 사례가 최근에 늘어나고 있다(Lee *et al.*, 1995; Moon, 1998; Choi *et al.*, 2000; 박노옥 등, 2003). 유용광물 탐사 등과 같이 탐사 목적에 대한 공간상의 정보가 거의 없거나 불확실한 경우에는 대체로 목표 유도형(target-driven) 공간통합이 주로 적용되었다(An *et al.*, 1991; Choi *et al.*, 2000). 이 경우 지질자료를 기존 광상 모델이나 전문가의 지식과 경험에 의존하여 표현하기 때문에 자료 표현이 다소 주관적이다. 이에 비해 자료 유도형(data-driven) 공간통합은 통합 목적에 대한 대상의 성격 및 특성을 공간자료로부터 표현하는 장점이 있다. 박노옥 등(2003)은 자료유도형 공간통합에 기초하여 공간통합을 퍼지소속함수를 이용한 자료표현(fuzzy membership function representation), 퍼지 연산자 네트워크를 이용한 자료 통합(fuzzy combination) 외에 비퍼지화(defuzzification) 및 검증(validation) 단계를 추가한 새로운 퍼지기반 지질자료 공간통합론을 제안하였다.

따라서 이 연구에서는 박노옥 등(2003)이 제안한 퍼지 기반 공간통합 기법을 적용하여 제주도의 지열수 부존 탐사를 수행하였다. 지질분포, 수계, 분석구 분포, 선구조, 항공물리탐사 자료 등 지열 자원과 관련된 지질정보들을 수집하고 이를 연속형 또는 범주형의 주제도를 작성한 후 퍼지소속함수로 변환한 뒤 최대(max), 최소(min), 산술합(algebraic sum), 산술곱(algebraic product), 감마(γ) 등 5개의 퍼지 연산자를 이용하여 공간통합을 실시하였다. 그리고 각 주제도의 통계적 상관관계 파악을 위해 퍼지소속함수(Fuzzy membership function)를 그래프에 도시하여 우선 발견위치와의 연관성을 검토하였다. 특히 검증을 위해 지하수의 지화학 성분으로 지열수의 가열당시 온도를 추정할 수 있는 지열온도계(geothermometer)를 적용하고 계산된 온도 분포를 통합결과와 대비하였다.

2) 퍼지기반 공간통합론

퍼지 이론에서는 퍼지소속함수(fuzzy membership

function)를 이용하여 자료를 표현한다. 격자 형태의 지질자료가 n 개 있을 때 연구 지역 내의 각각의 자료는 $E_k(k=1, \dots, n)$ 로 나타낼 수 있다. 지질자료 E_k 를 통합목적에 맞도록 표현하기 위해서, E_k 를 구성하는 각각의 속성값 또는 실제 관측값은 다음과 같은 수학적 매핑(mapping)을 통해 표현된다.

$$d_k: E_k \rightarrow [0, 1] \quad (1)$$

부울집합론에서는 이 매핑을 통하여 이진수의 의미로 존재의 유무만을 지시하나, 지질자료를 다루는 경우에는 통합목적에 위하여 지질자료를 매핑하는 과정에서 0과 1 사이의 값들이 실제로 중요한 의미를 갖게 된다. 따라서 퍼지 이론은 이러한 사항을 효과적으로 처리할 수 있는 중요한 방법으로 간주될 수 있다.

일반적으로 퍼지소속함수는 여러 가지 형태의 기준에 알려진 연속, 불연속 함수를 이용하여 표현될 수 있다. 지질자료를 퍼지소속함수로 표현할 때 특정 속성에서 발생하는 빈도수에만 의존하는 기존 방법에 비해, 우도비(likelihood ratio)를 사용하는 방법은 다른 속성과의 상대적인 의미까지 내포하는 장점이 있다(박노옥 등, 2003). 예를 들어 유용한 광물자원 탐사에서 연구지역 내 기존 광상의 위치가 포함된 공간자료의 특성은 광상이 포함되지 않은 지역의 공간 자료 특성과 대비되는 양상을 보이게 된다. 이는 광상 위치 포함 지역과 미포함 지역에서의 빈도수 분포 또는 확률 분포가 다름을 의미한다. 어떤 사건이 특정 속성에서 일어나지 않을 확률에 대한 일어날 확률의 비로 정의되는 우도비(λ)는 이러한 차이를 정량적으로 부각시킬 수 있는 장점이 있다(Duda *et al.*, 1976).

$$\lambda = P\{E_{ck} | T_p\} / P\{E_{ck} | \bar{T}_p\} \quad (2)$$

여기서 T_p 와 \bar{T}_p 는 각각 "특정 화소 p 에 특정 유용광상이 존재한다"와 "특정 화소 p 에 특정 유용광상이 존재하지 않는다"로 각각 대체될 수 있다.

우도비는 $[0, \infty]$ 의 값을 가지게 되는데, 우도비가 1보다 클수록 그 속성에서 특정 사건의 발생 가능성이 높음을 의미하며, 1보다 작을수록 발생 가능성이 낮은 것을 의미한다. 퍼지소속함수는 $[0,$

1]의 값을 가져야 하기 때문에 우도비를 퍼지소속함수로의 변환과정이 필요하다. 이를 위해 로지스틱 타입의 변형식을 이용하여 우도비를 최종적으로 퍼지 소속함수로 변환한다.

$$\mu_k = \lambda_k / (1 + \lambda_k) \quad (3)$$

여기서 μ_k 와 λ_k 는 E_k 의 퍼지소속함수와 우도비를 각각 나타낸다.

개별 지질자료 E_k 에 대해서 통합목표에 대한 퍼지소속함수가 결정되면, 이들을 하나의 퍼지소속함수로 통합하기 위해 퍼지 연산자를 이용하게 된다. 퍼지소속함수를 통합하기 위한 여러 퍼지 연산자 중에서 지질자료의 통합에 적용 가능한 연산자로는 최대(max), 최소(min), 산술합(algebraic sum), 산술곱(algebraic product), γ 연산자 등이 있다(Table 2)(An et al., 1991; Moon, 1998; Choi et al., 2000).

최대 연산자 μ_{Max} 와 최소 연산자 μ_{Min} 는 각각 논리적으로 OR과 AND의 의미를 가지며, 최대값과 최소값을 각각 통합된 결과값으로 넘겨주기 때문에 결과적으로는 각각 최대값과 최소값을 가지는 하나의 E_k 의 소속함수만이 영향을 미치게 된다. 산술합 연산자는 최대값과 같거나 큰 결과값을 통합된 결과로 넘겨주며, 반대로 산술곱 연산자는 최소값과 같거나 작은 결과값을 통합된 결과로 넘겨주게 된다. 반면 γ 연산자는 0에서 1 사이의 값을 가지는 γ 값에 따라 산술합과 산술곱의 결

과를 절충하는 결과를 보여준다.

5. 결과 및 토의

1) 온천 발견 위치와 공간자료의 상관성 분석

지질도, 수계 분포 밀도도, 분석구 분포 밀도도, 선구조 분포 밀도도, 항공자력도, 항공방사능도 등 각 주제도 별 퍼지소속함수(Fuzzy membership function)를 그래프에 도시하여 온천 발견 위치와의 상관성을 검토하였다.

우선 지질도에서는 현무암(I), 조면현무암(II), 조면현무암(IV), 조면암, 조면현무암(VI), 현무암(III), 조면현무암(VII), 조면현무암(VIII) 등 다양한 분출시기의 화산지질과 상관성을 나타내었다(Fig. 4a). 특히 조면현무암(II) 지역이 퍼지소속함수가 가장 높게 나타났는데, 구좌읍 세화리, 송당리, 종달리에 5공의 온천 개발 관정이 밀집되어 있기 때문이다. 그리고 현무암(I), 조면현무암(IV), 조면암 지역의 퍼지소속함수가 다음으로 높게 나타났다. 이러한 결과로 보아 분출시기가 오래될수록 온천 발견 위치와의 상관성이 높은 것으로 판단된다.

수계 분포밀도에서는 분포 밀도 1.4 이하의 지역에서 퍼지소속함수가 높게 나타났다(Fig. 4b). 이는 분포밀도가 낮은 지역이 온천 발견 위치와 상관성이 높음을 의미한다. 제주도는 투수성이 대

Table 2. Fuzzy combination operators (Park et al., 2003).

| Operator | Equation |
|-------------------|---|
| Maximum | $\mu_{Max} = \text{Max}\{\mu_{E_1}, \mu_{E_2}, \dots, \mu_{E_n}\}$ |
| Minimum | $\mu_{Min} = \text{Min}\{\mu_{E_1}, \mu_{E_2}, \dots, \mu_{E_n}\}$ |
| Algebraic sum | $\mu_{Sum} = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - \mu_{E_k})$ |
| Algebraic product | $\mu_{Product} = 1 - \prod_{k=1}^n \mu_{E_k}$ |
| Gamma | $\mu_{\gamma} = \left(1 - \prod_{k=1}^n (1 - \mu_{E_k})\right)^{\gamma} \times \prod_{k=1}^n (\mu_{E_k})^{1-\gamma} \quad (0 < \gamma < 1)$ |

단히 양호한 화산암으로 구성되어 있기 때문에 경사가 급한 남북 지역에 수계가 밀집되어 발달하고 있으며, 경사가 완만한 동서지역은 수계발달이 빈약하다. 따라서 현재 온천 발견 위치가 주로 동서 지역에 분포하고 있기 때문에 수계발달이 낮은 곳의 퍼지소속함수가 높은 것으로 판단된다.

분석구 분포 밀도도에서는 4 이하로 분포밀도가 낮은 곳의 퍼지소속함수가 높게 나타났다(Fig.

4c). 이는 분석구가 밀집될 경우 이에 수반된 지질 구조적 균열이 발달하여 오히려 지표수의 유입 등에 의한 냉각이 쉽게 이루어질 수 있기 때문으로 판단된다.

선구조 분포 밀도도에서도 1.4 이하의 밀도가 낮은 지역에서 퍼지소속함수가 높게 나타났다(Fig. 4d). 분석구의 분포밀도와 동일한 원인으로 판단된다.

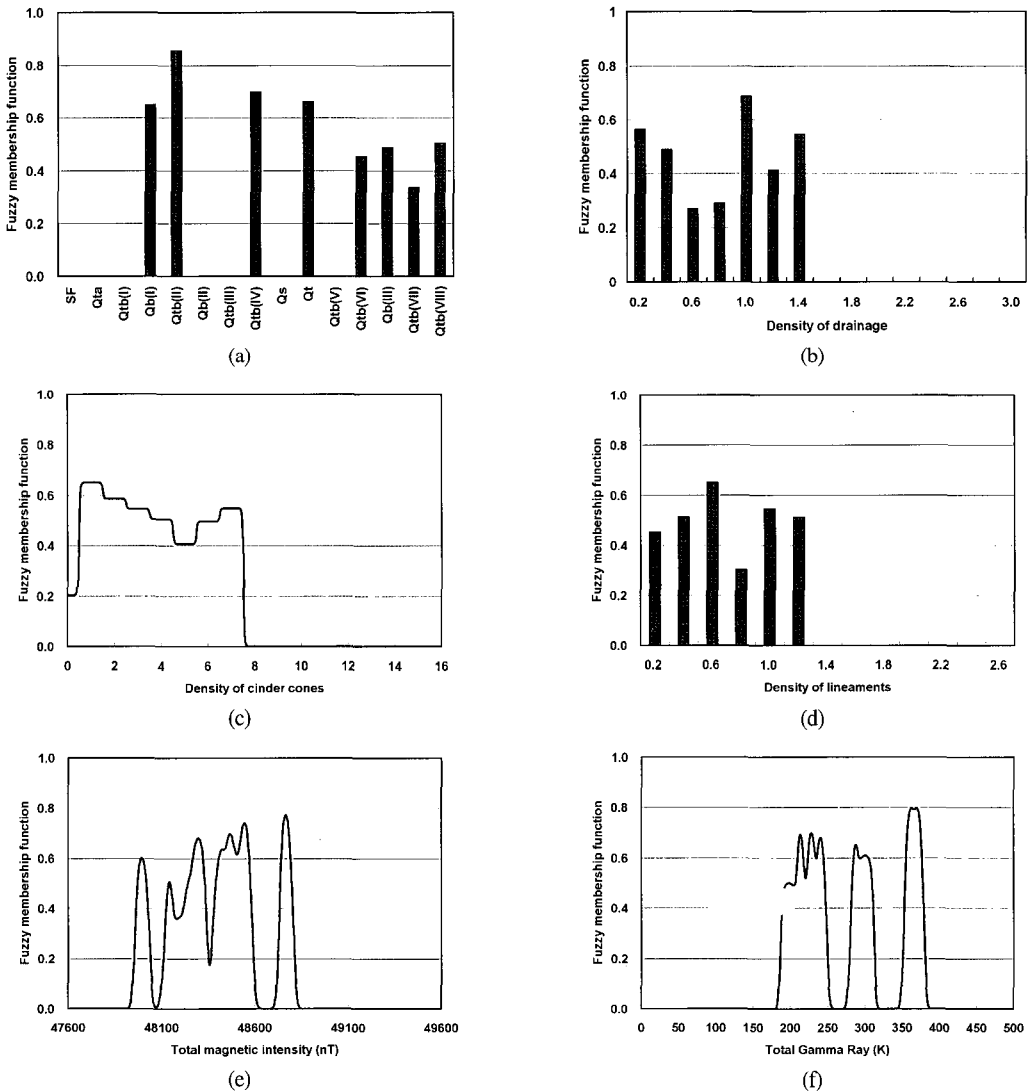


Fig. 4. Fuzzy membership functions. (a) geological map (SF : Seogwipo Formation, Qta : Trachyandesite, Qtb : Trachybasalt, Qb : Basalt, Qs : Sediments), (b) density of drainage system, (c) density of cinder cones, (d) density of lineaments, (e) aerial survey map for total magnetic intensity and (f) total gamma ray.

항공자력도에서는 중간 범위(48,000~48,800 nT)에서 퍼지소속함수가 높았다(Fig. 4e). 일반적으로 대자율이 낮은 지역은 지질구조, 단층, 파쇄대와 관련되므로, 이러한 지질구조적 약대의 직접적인 영향이 적은 지역이 온천 발견 위치와 상관성이 높은 것으로 판단된다.

항공방사능도에서도 중간 범위(200~400 K)에서 퍼지소속함수가 높게 나타났다(Fig. 4f). 일반적으로 방사성 핵종들이 농집되는 지하 심부의 균열에서 감마선 강도가 높아지므로, 이러한 균열의 직접적인 영향을 받지 않는 곳이 지열 보존 가능성이 높은 것으로 판단된다.

2) 공간 통합 결과

퍼지소속함수를 결정한 후 최대 연산자, 최소 연산자, 산술합 연산자, 산술곱 연산자, γ 연산자를 각각 사용하여 통합한 결과를 서로 비교하였다.

최대 연산자의 경우 제주도 동부, 북서부 지역에서 현저히 높은 지열부존 가능성을 나타내었다(Fig. 5a). 이러한 결과는 지질도의 조면현무암(II)와 조면현무암(IV) 지역에서 온천 발견 지점이 집중되어 있어 퍼지소속함수가 월등히 높았고 최대 연산자를 통해 그 효과가 부각된 것이다. 최소 연산자의 경우, 제주도 서북부와 동부 중앙 및 동남부의 넓은 지역에서 낮은 지열부존 가능성을 나타내고 있다(Fig. 5b). 이는 지질도상에서 조면안산암, 조면현무암(I), 현무암(II), 조면현무암(III), 조면현무암(V) 지역으로 온천이 발견되지 않아 상대적으로 퍼지소속함수가 낮게 나타났고, 최소 연산자를 사용함으로써 지열부존 가능성이 현저히 낮게 표현된 것이다. 산술합, 산술곱 및 γ 연산자($\gamma=0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 0.9$)의 경우 통합결과가 유사하게 나타났다(Fig. 5c, 5d, 5e). 특히 최대 연산자와 최소 연산자에서의 특정 클래스 부각효과는 γ 값에 따라 절충되어 나타났다.

퍼지 연산자 각각에 대한 통합 결과와 통합에 사용한 온천 발견 위치에 대한 적합성을 정량적으로 평가하기 위하여 Chung and Fabbri(1999)에 의해 제안된 성공비율곡선(success rate curve)을 작

성하였다(Fig. 6). 성공비율곡선에서 x축은 클래스 값을 나타내며, y축은 x축에 해당하는 클래스 안에 포함되는 온천 발견 위치의 누적비율을 나타낸다. 만약 온천 발견 위치에 대한 설명능력이 좋다면 적은 면적을 차지하는 상위 클래스에서 온천 발견 위치의 포함 비율이 높을 것이기 때문에 그래프는 좌상단으로 치우친 형태를 나타내게 된다.

성공비율곡선을 작성한 결과 γ 연산자($\gamma=0.75$)를 이용한 통합 결과가 가장 높은 온천 발견 위치를 설명하고 있는 것으로 나타났으며, 최대 연산자($\gamma=0.75$)를 사용한 통합결과는 연구지역의 상위 10%에 해당되는 지열 부존 가능 지역에서 온천 발견 위치의 약 93%를 포함하고 있다.

Fig. 7는 γ 연산자($\gamma=0.75$)를 사용하여 통합한 결과 위에 온천 발견 위치를 중첩한 것이다. 80% 이상의 높은 성공비율을 나타내는 붉은 색 지역에 온천 발견 위치가 표시된다. 특히 그림에서 검은 색은 성공비율이 99%-100%인 지역으로 지열 부존 가능성이 가장 높음을 의미한다. 따라서 현재 발견된 온천 위치 외에 제주도 서북부의 북제주군 애월읍 어음리와 고성리 지역에 폭 1km 정도의 검은색 지역이 나타나는데, 새로운 지열 부존 가능성이 제기된다.

3) 검증

공간통합 결과를 검증하기 위해 지하수 수질 자료를 이용한 지질온도계 적용 결과와 공간적 분포 특성을 대비하였다. 지하수 수질 분석 자료는 제주도에서 수행한 지하수 보전·관리계획 자료집(2000)에서 발췌하였고, 염수 침입이나 환경 오염에 의한 지질온도계 적용에서의 오차범위를 줄이기 위하여 화학적 성분비가 과도한 자료는 제외하였다. 즉 전하 균형(ion charge balancing)이 크게 맞지 않거나 Na/Cl 성분비가 1보다 큰 자료는 제외시켰고, 지하수의 진화가 유리한 Ca이 많은 자료를 선별하였다. 지질온도 계산은 Giggensbach(1988)가 제안한 양이온 지질온도계 중에서 K-Mg 모델을 이용하였으며, 식은 다음과 같다.

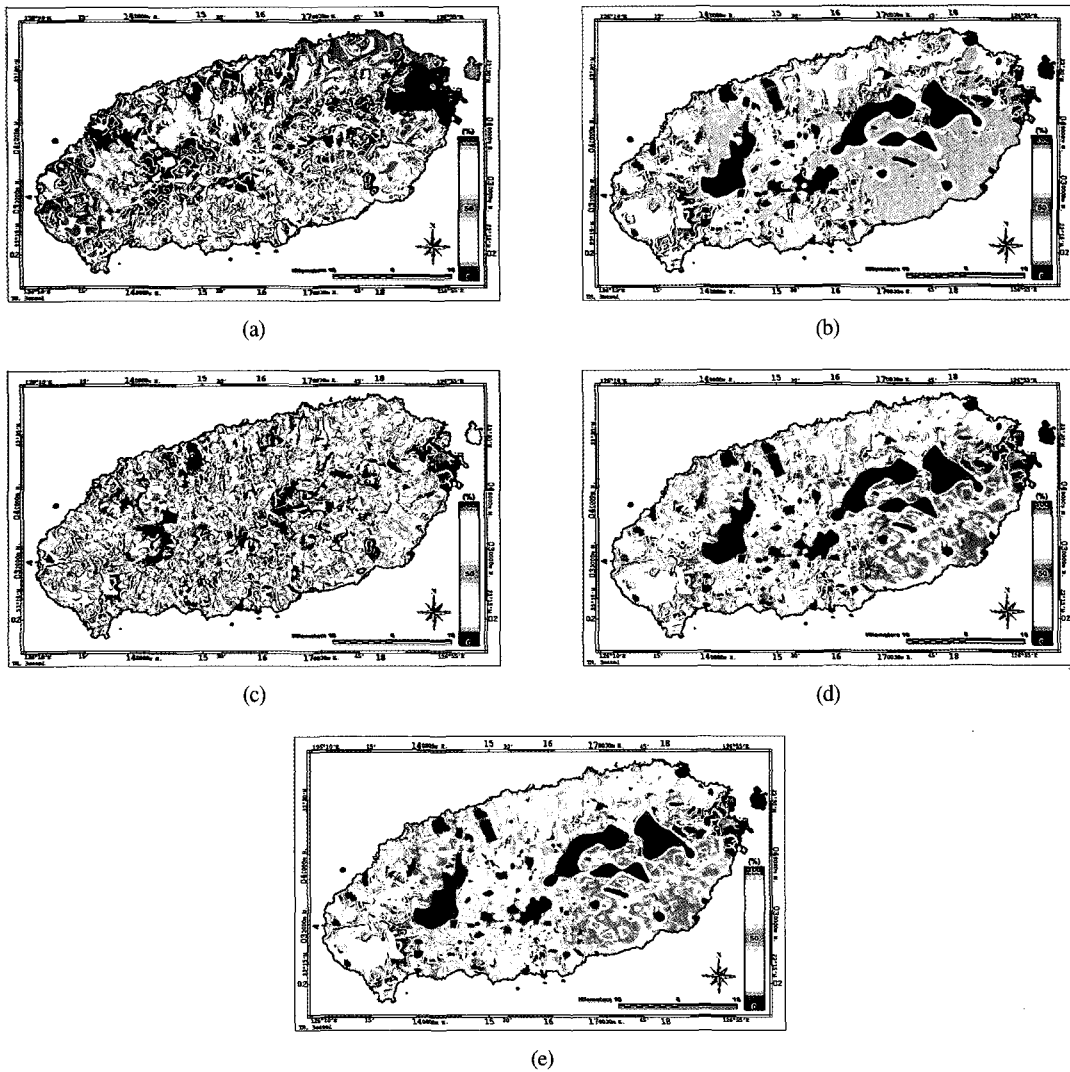


Fig. 5. Fuzzy integration results using (a) maximum operator, (b) minimum operator, (c) algebraic sum operator, (d) algebraic product operator, and (e) gamma operator ($\gamma=0.9$).

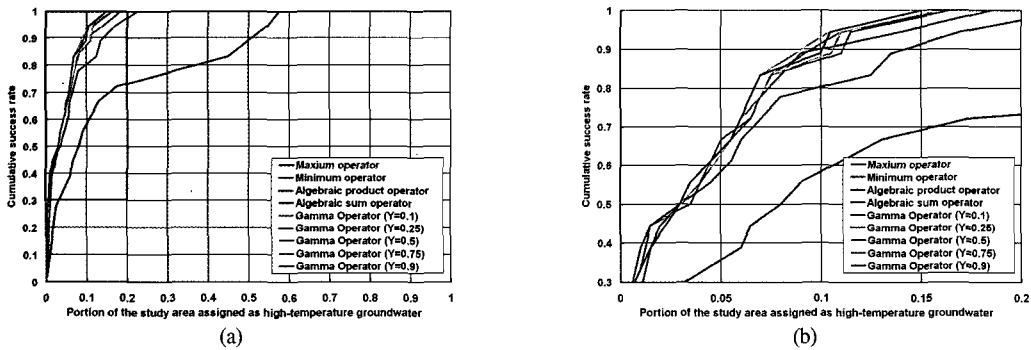


Fig. 6. (a) Success rate curves of geothermal potential water mapping by fuzzy set operators. The black rectangle area has been enlarged and is shown in (b).

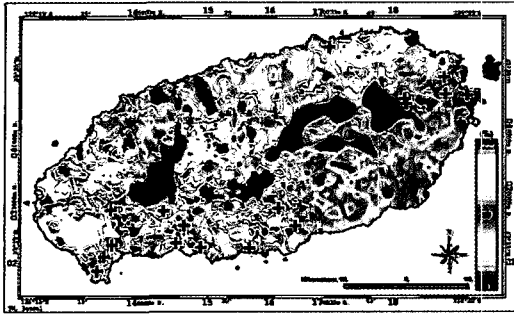


Fig. 7. Overlay of the spa on fuzzy integration result using algebraic sum operator.

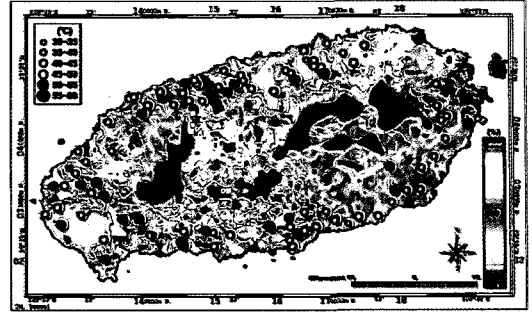


Fig. 8. Overlay of calculated temperature by groundwater geothermometer on fuzzy integration result using algebraic sum operator.

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{4410}{[14 - \log(\text{K}^2/\text{Mg})]} - 273.15 \quad (4)$$

γ 연산자를 이용한 통합 결과 위에 지하수의 지질 온도계 산출 온도를 중첩한 결과 50°C 이상의 상대적으로 높은 지질온도 위치가 지열 부존 성공비율 70% 이상 지역에 거의 대부분 분포하고 있어 통합 결과의 신뢰도가 높은 것으로 판단된다(Fig. 8).

6. 결론

이 연구에서는 지질도, 수계 밀도, 분석구 분포 밀도, 선구조 분포 밀도, 항공물리탐사 자료를 이용하여 주제도를 작성하고, 지질정보 사이의 통계적 관계를 이용한 퍼지 기반의 GIS 통합기법을 적용함으로써 제주도의 지열 부존 가능지역을 추출하였다.

퍼지소속함수에 의한 온천 발견 위치와의 상관성을 분석한 결과 용암류의 분출시기가 오래될수록 상관성이 높았다. 수계, 분석구 및 선구조에서는 분포밀도가 낮은 곳에서 상관성이 높게 나타났으며, 항공자력도와 항공방사능도에서도 대자율 및 감마선 강도가 중간 범위인 곳에서 상관성이 높은 것으로 나타났다. 특히 지열 잔존 가능성이 높을 것으로 예상했던 분석구에서는 분포밀도가 낮은 곳에서 퍼지소속함수가 높게 나타났다. 이러한 결과는 화산활동으로 지질구조적 균열이 수반

되어 지하수의 빠른 침투로 인한 냉각이 쉽게 이루어지기 때문인 것으로 판단되었다.

최대, 최소, 산술합, 산술곱, γ 등 5가지 퍼지 연산자를 적용한 통합결과에서는 γ 연산자($\gamma=0.75$)가 가장 높은 성공비율을 보였으며, 제주도 서북부 일부지역에서 새로운 지열 부존 가능성이 제기되었다.

향후 연구에서는 지하구조와 관련된 시추자료, 심부물리탐사자료 등과의 복합 해석이 필요하며, 지화학 열평형 모델링을 통한 지열 저장지의 온도 추정 연구를 병행함으로써 보다 정밀한 지열 부존 예상지역 추출이 가능할 것으로 사료된다.

사 사

이 연구를 위해 아낌없는 지원과 조언을 해주신 한국지질자원연구원 지광훈 박사님께 진심으로 감사 드립니다. 또한 이 논문에 대해 세심한 조언을 해주신 심사위원들께 감사 드립니다.

참고문헌

- 고기원, 1991. 제주도 서귀포층의 지하분포 상태와 지하수와의 관계. 지질학회, p.528.
- 고기원, 1997. 제주도의 지하수 부존 특성과 서귀

- 포층의 수문지질학적 관련성. 박사학위논문, 부산대학교.
- 김현국, 1994. 제주도 온천에 관한 연구. 최고경영관리자과정 논문집, 부산수산대학교, 11: 157-173.
- 박노욱, 지광훈, Chung, C.J.F., 권병두, 2003. 퍼지 이론을 이용한 GIS 기반 자료유도형 지질 자료 통합의 이론과 응용. *자원환경지질*, 36(3): 243-255.
- 박준범, 권성택, 1991. 제주도 화산암의 암석화학적 진화(2): 제주 동부 율라봉 부근 시추코아 연구. *지질학회*, p.531.
- 윤상규, 김원영, 1984. 제주지역 지열조사 연구. 국토이용지질조사 연구, 한국자원연구소, 83-5-08: 109-140.
- 윤 선, 고기원, 김인탁, 1995. 제주도 형성사. *제주도지*, 98: 148-164.
- 제주도, 2000. 제주도 지하수 보전·관리계획 보고서. 제주도, 한국수자원공사, 2003. 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(III).
- 통상산업부, 1996. 제주도 지열자원탐사 및 최적활용방안 연구(III).
- 한국동력자원연구소, 1986. 항공방사능 및 자력도 (제주도동부, 제주도서부).
- 한국자원연구소, 1992. 제주도 온천자원 조사 보고서. 한국자원연구소, 2000. 제주(백아도, 진남포) 지질도폭 설명서(1:250,000).
- An, P., W. M. Moon, and A. Rencz, 1991. Application of fuzzy set theory to integrated mineral exploration, *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 27(1): 1-11.
- Aronoff, S., 1989. *Geographic information systems: a management perspective*, WDL Publications, Ottawa, Canada.
- Burrough, P. A. and R. A. Macdowell, 1998. Principles of geographical information systems, *Natural Resources Research*, 10: 125-136.
- Choi, S. W., W. M. Moon, and S. G. Choi, 2000. Fuzzy logic fusion of W-Mo exploration data from Seobyeg-ri, Korea, *Geosciences Journal*, 4(2): 43-52.
- Chung, C. F. and A. G. Fabbri, 1999. Probability prediction models for landslide hazard mapping, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(12): 1389-1399.
- Duda, R. O., P. Hart, and N. Nilsson, 1976. Subjective Bayesian methods for rule-based inference systems, *Proceedings of the 1976 National Computer Conference*, 1075-1082.
- Giggenbach, W. F., 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(12): 2749-2765.
- Lee, K. W. and K. H. Chi, 1995. Spatial integration of multiple data set regarding geological lineaments using fuzzy set operation, *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*, 11(3): 49-60.
- Moon, W. M., 1998. Integration and fusion of geological exploration data: a theoretical review of fuzzy logic approach, *Geoscience Journal*, 2(4): 175-183.