

경상분지 남부지역의 지열 부존 잠재력 평가를 위한 퍼지기반 자료통합의 적용성 연구

박맹언 · 백승균* · 성규열

부경대학교 환경지질학과

Applicability of Fuzzy Logic Based Data Integration to Geothermal Potential Mapping in Southern Gyeongsang Basin, Korea

Maeng-Eon Park, Seung-Gyun Baek* and Kyu-Youl Sung

Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University

The occurrence of geothermal water has high correlates highly with fossil geothermal system. A fuzzy logic based data integration is applied for geothermal potential mapping in the Southern Gyeongsang Basin which is distributed in the regional fossil geothermal system. Several data sets are related with the origin and distribution of fossil geothermal system, such as the geological map, the density of lineaments, the aerial survey map of magnetic intensity, the map of hydrothermal alteration, the distribution density of hydrothermal mines, which were collected as thematic maps for the integration. Fuzzy membership functions for all thematic maps were compared to the locations of the spa hot springs, which were used as ground-truth control points. After integrating all thematic maps, the results of gamma operator ($\gamma=0.1$) was showed the highest success rate, and new geothermal potential zone is prospected in some area.

Key words : Fossil geothermal system, Fuzzy logic, Data integration, Geothermal potential mapping, Gyeongsang Basin

지열수의 부존은 화석열수계(fossil geothermal system)의 분포와 밀접한 연관성을 가지므로, 활발한 화석열수계에 의한 광역적인 열수변질대가 분포하는 경상분지 남부지역을 대상으로 GIS 공간통합기법을 적용한 지열 부존 잠재력을 탐사하였다. 연구방법은 화석열수계의 기원 및 분포와 관련된 지질, 열수변질대, 열수형 광상 분포, 선구조 밀도, 항공자력도 등 주제도를 작성하고, 현행 온천 분포와의 상관성을 파악하여, 공간통합을 실시하였다. 그 결과 퍼지 연산자 중에서는 γ 연산자($\gamma=0.1$)가 가장 높은 성공비율을 나타내었으며, 일부 지역에서 새로운 지열수 부존 가능성이 예상된다.

주요어 : 화석열수계, 퍼지이론, 자료통합, 지열 부존 잠재력 탐사, 경상분지

1. 서 론

지열수의 부존은 화석열수계(fossil geothermal system)의 분포와 밀접한 연관성을 가지는데, 이는 지질시대동안 지열수에 의한 지질학적 특성이 수반되는 지역으로서, 상대적으로 높은 현생 지열수계의 잠재력을 지니고 있기 때문이다. 경상분지 남부지역은 동래,

해운대, 마금산, 고성 등의 온천이 분포하는 지열대로서, 높은 지열에너지 부존 가능성으로 인해 많은 지질, 지구화학 및 지구물리학적 연구가 수행되었다(Um *et al.*, 1964; Lee and Chung, 1997; Kim *et al.*, 1992; Song *et al.*, 2004). 따라서 활발한 화석 지열수계의 작용으로 광역적인 열수변질대가 분포하는 경상분지 남부지역을 대상으로, GIS 공간통합 분석기법을

*Corresponding author: sgbaek@pknu.ac.kr

적용하여 현행 온천 분포와의 상관성을 파악함으로써 이 지역의 지열 부존 잠재력을 살펴보고자 하였다.

국내의 지열에 관한 연구로는 한반도의 지열 연구 (Chang, 1970), 한반도 주변지역의 지열류량 연구(Han and Chapman, 1985), 한반도의 지열류량 분포도 작성 연구(Lim *et al.*, 1989), GIS 기법에 의한 남한지역의 암상, 지질시대와 지온경사를 및 지열류량과의 상관성 분석 연구(Kim *et al.*, 2002, 2004), GIS 공간통합분석 기법에 의한 제주도의 지열부존 잠재력 탐사 연구 (Baek and Park, 2005) 등이 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 유용광물 탐사와 산사태 예측과 같이 탐사목적에 대한 공간상의 정보가 거의 없거나 불확실한 경우 지질자료를 효율적으로 다룰 수 있는 퍼지이론 (fuzzy theory)을 도입한 공간통합 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 그 적용 범위가 넓어지고 있다(Lee and Chi, 1995; Moon, 1998; Choi *et al.*, 2000; Park *et al.*, 2003).

이 연구에서는 퍼지기반의 공간통합(Fuzzy logic based data integration) 분석 기법을 적용하여 화석 지열수계의 분포특성을 파악하였다. 이를 위해 지질도, 선구조 분포도, 항공지력도, 열수변질대, 열수형 광상 분포도 등의 주제도를 작성하고, 각 주제도 별 퍼지 소속함수(Fuzzy membership function)를 그래프에 도시하여 온천과의 상관성을 검토하였다.

현재까지 우리나라 고온 온천수의 성인과 지열류량 및 화성암체의 열 생성 등과의 상관성에 대한 체계적인 연구가 수행되어 있지 않아, 공간통합분석에 의한 지열 부존 잠재력의 평가는 지열 부존 탐사에 유용한 자료로 활용될 것으로 생각된다.

2. 지질환경

경상분지 남부의 백악기 경상누층군은 녹회색 및 암회색을 띠는 사암과 셰일, 소량의 응회질 사암, 역암 및 이회암층으로 구성된 하양층군과 백악기 말에 분출한 안산암류로 구성된 유천층군으로 구성되어 있다. 이들 지층을 백악기 말기의 불국사화강암류와 고제3기의 왕산석영안산암질화산암류가 관입하고 있으며(Yoon *et al.*, 1991), 신생대 전기 마이오세의 범곡리층과 장기층군, 중기 마이오세의 연일층군이 그 상위에 놓인다. 이

들 제3기 퇴적분지의 전기 마이오세는 데사이트와 현무암질 화산암류가 주를 이루며 하성 및 호성 퇴적물이 교호하는 반면에 중기 마이오세는 화산물질을 포함하지 않는 해성 퇴적물로 대부분 구성되어 있다(Yoon *et al.*, 1991; Yoon, 1991).

경상분지는 태평양판의 섭입과 관련된 조구조 활동의 결과로 분지의 형성·변환 및 화성활동이 수반되었다. 또한, 경상분지의 동부에는 일정한 방향성을 갖는 수조의 단층들이 발달하고 있으며, 이들 단층 운동사를 근거로 동해의 성인과 신생대의 지각변형사에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Han *et al.*, 1987; Yoon, 1991; Kim, 1992; Son, 1998). 신생대 제3기 동안의 지각변형 과정에서 한반도 동남부에는 화산활동이 빈번하게 발생하였으며(Yoon, 1991, 1997; Son, 1998), 일정한 방향성을 가지는 지각균열을 따라 암맥군들이 형성되어 있다(Kim *et al.*, 2002a, b; Kim *et al.*, 2005). 이들 암맥들은 염기성, 중성, 산성 암맥으로 분류되며, 암석기재적 양상, 특징적인 원소들의 함량과 조구조 판별도에서 지판의 침강 섭입과 관련된 동일한 마그마에서 파생된 암맥군으로 조구조 환경이 조산대 화산호와 관련이 있음을 지시한다(Kim *et al.*, 2002b)

연구 대상지역은 경상분지 동남부에 해당하는 부산, 마산, 창원, 진해, 김해, 밀양, 양산 일대로서 중생대 백악기 화성활동과 관련된 고령도-납석 광상과 구리, 금, 철 등 열수형 광상이 광범위하게 분포하고 있으며 (Sang, 1992; Lee *et al.*, 2003), 해운대, 동래, 부곡, 마곡산 등 다수의 온천이 분포하고 있다(Kim and Choi, 1998).

3. 공간통합 기법의 적용

3.1. GIS 공간통합 방법

현재 GIS 공간분석을 위한 다양한 수학적 논리적 자료 통합론이 개발되어 있다. 이중 베이저안 조건부 확률 모델, Weight of Evidence, 로지스틱 회귀분석 등 (Bonham-Carter *et al.*, 1988; Chung and Fabbri, 1999)과 같은 확률론적 공간통합의 경우 분석목적에 대한 공간상의 사전정보를 필요로 하거나, 자료의 종속 관계와 같은 특별한 가정을 필요로 한다(Park *et al.*, 2003). 이에 반해 퍼지이론은 집합에의 경계값 설정에 유연성을 가지며, 집합에의 포함을 정도(degree)로 나타냄으로써 부분적인 소속이 가능하기 때문에 명확하지 않은 공간자료의 특성을 살리고 기존 확률론에서의 엄격한 경계설정으로 인하여 발생하는 공간자료의 손

실을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다(Zadeh, 1978; Zimmerman, 1984; Moon, 1998). 퍼지이론을 적용한 공간통합은 자료표현 방식에 따라 목표유도형(target-driven)과 자료유도형(data-driven)으로 구분할 수 있는데, 지질학에 적용되어온 퍼지이론의 경우 유용광물 탐사와 산사태 예측과 같이 탐사목적에 대한 공간상의 정보가 거의 없거나 불확실한 경우가 대부분이기 때문에 목표 유도형(target-driven) 공간통합이 주로 적용되어 왔다(An et al., 1991; Choi et al., 2000). 이 경우 지질자료를 기존 광상 모델이나 전문가의 지식과 경험에 따라 자료 표현의 방식과 결과가 달라지며 기준 설정이 애매하기 때문에 자료의 표현이 다소 주관적인데 반해, 자료 유도형(data-driven) 공간통합은 통합 목적에 대한 대상의 성격 및 특성을 공간자료로부터 표현하므로 객관적이고 일반화할 수 있는 장점이 있다(Park et al., 2003). Park et al.(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.

이 연구에서는 Park et al.(2003)이 제안한 퍼지 기반 공간통합 기법을 적용하여 화석지열수계와 관련된 경상분지의 지열수 부존 잠재력 탐사를 수행하였다. 지질도, 선구조 분포, 항공자력탐사, 열수변질대, 열수형 광상 분포 자료 등 화석지열수계와 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 현재 운영 중인 온천 산출지와의 연관성을 검토하였다.

3.2. 퍼지기반 공간통합이론

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

$$d_k: E_k \rightarrow [0, 1] \tag{1}$$

일반적으로 퍼지 소속함수는 여러 가지 형태의 기존에 알려진 연속, 불연속 함수를 이용하여 표현될 수 있다. 퍼지 소속함수로는 Delta 함수, Step 함수, Ramp 함수, S 함수, 대칭 또는 비대칭형이 벨 형 함수 등이 이용되고 있다(Burrough and Macdowell, 1998). 그러나 지질도, 토양도, 임상도 등과 같은 범주형 자료의 경우 특정 형태의 연속형 함수로의 표현이 불가능하기 때문에, 위와 같은 함수로는 지질자료에의 직접적인 적용이 힘든 경우가 많다(Park et al., 2003). 기존 통계적 특성에 기반한 자료 표현 방법은 다른 속성에서 대상 사건이 발생하지 않은 상황에 대한 고려를 못하는 단점이 있으나, 우도비를 사용하는 방법은 다른 속성에 대한 고려를 하기 때문에 다른 속성과의 상대적인 의미를 내포하는 장점이 있다(Park et al., 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 다를 수 있음을 의미한다. 어떤 사건이 특정 속성에서 일어나지 않을 확률에 대한 일어난 확률의 비로 정의되는 우도비(λ)는 이러한 차이를 정량적으로 부각시킬 수 있는 장점이 있다(Duda et al., 1976).

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

여기서 T_p 와 \bar{T}_p 는 각각 “특정 화소 p에 특정 유용 광상이 존재한다”와 “특정 화소 p에 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.

$$\mu_k = \lambda_k / (1 + \lambda_k) \tag{3}$$

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

개별 지질자료 E_k 에 대해서 통합목적에 대한 퍼지소속함수가 결정되면, 이들을 하나의 퍼지소속함수로 통합하기 위해 퍼지 연산자를 이용하게 된다. 퍼지소속함수를 통합하기 위한 여러 퍼지 연산자 중에서 지질

Table 1. 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	$\mu_{Product} = \prod_{k=1}^n (1 - \mu_{E_k})$
Gamma	$\mu_{\gamma} = \left(1 - \prod_{k=1}^n (1 - \mu_{E_k})\right)^{\gamma} \times \prod_{k=1}^n (\mu_{E_k})^{1-\gamma} (0 < \gamma < 1)$

자료의 통합에 적용 가능한 연산자로는 최대(max), 최소(min), 산술합(algebraic sum), 산술곱(algebraic product), γ 연산자 등이 있다(Table 1)(An *et al.*, 1991; Moon, 1998; Choi *et al.*, 2000).

4. 주제도 작성

경상분지의 지열 부존 잠재력 탐사를 위한 GIS 공간통합 기법의 적용에 사용된 공간자료로는 (1) 지질도, (2) 선구조 분포 밀도도, (3) 항공자력도, (4) 열수 변질대 분석결과, (5) 열수형 광상 분포밀도 등이다. 공간자료의 격자크기는 60 m이며, 1903×1237 화소의 GIS 데이터베이스로 구축하였다(Table 2).

기준입력자료(ground truth control point)는 ‘한국 온천(www.spakorea.pe.kr)’ 사이트로부터 현재 지구지정 및 운영 중인 온천의 주소를 발췌하고, 단순한 심부시추에 의한 행정적인 온천(25°C 이상)을 제거하기 위하여 지하증온율 3°C/km 이상을 적용하여 자료를 선별하였다. 그 결과 부산(동래, 해운대 등) 9개소, 울산(가지산 등) 5개소, 경남(마금산, 부곡 등) 6개소 등 총 20개 지점의 지리좌표를 획득하였다(Fig. 1).

Table 2. Data units and classes of each data sets.

Data sets	Data Units			Classes
	Min.	Max.	Interval	
Geological map	-	-	-	20
Density of lineaments	0.0	2.6	0.2	13
Aerial magnetic intensity (nT)	0	1,016	-	-
Density of hydrothermal alteration zone	0.0	4.0	-	-
Density of epithermal ore deposits	0	7	1	8

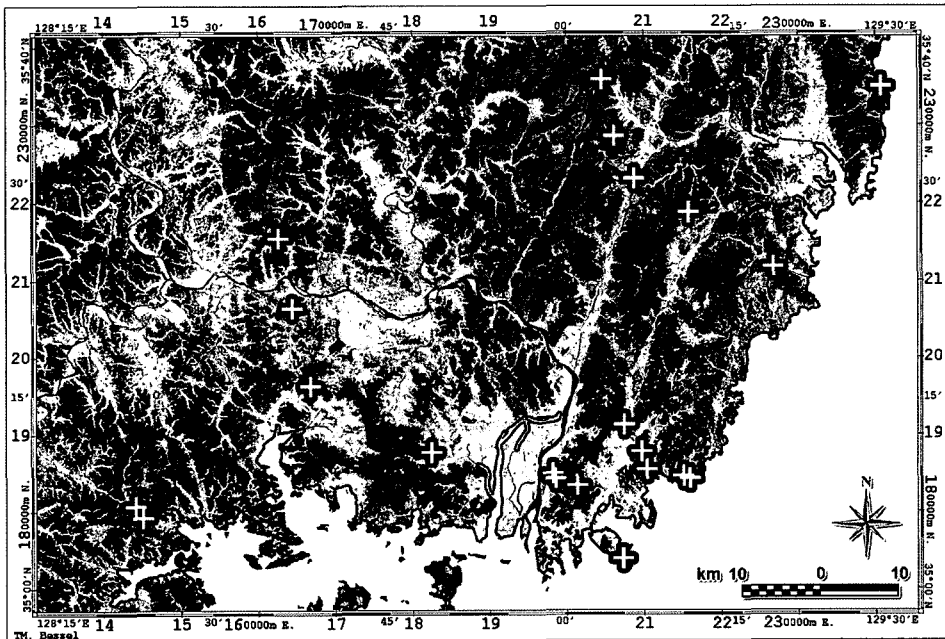


Fig. 1. Locations of hot springs in study area.

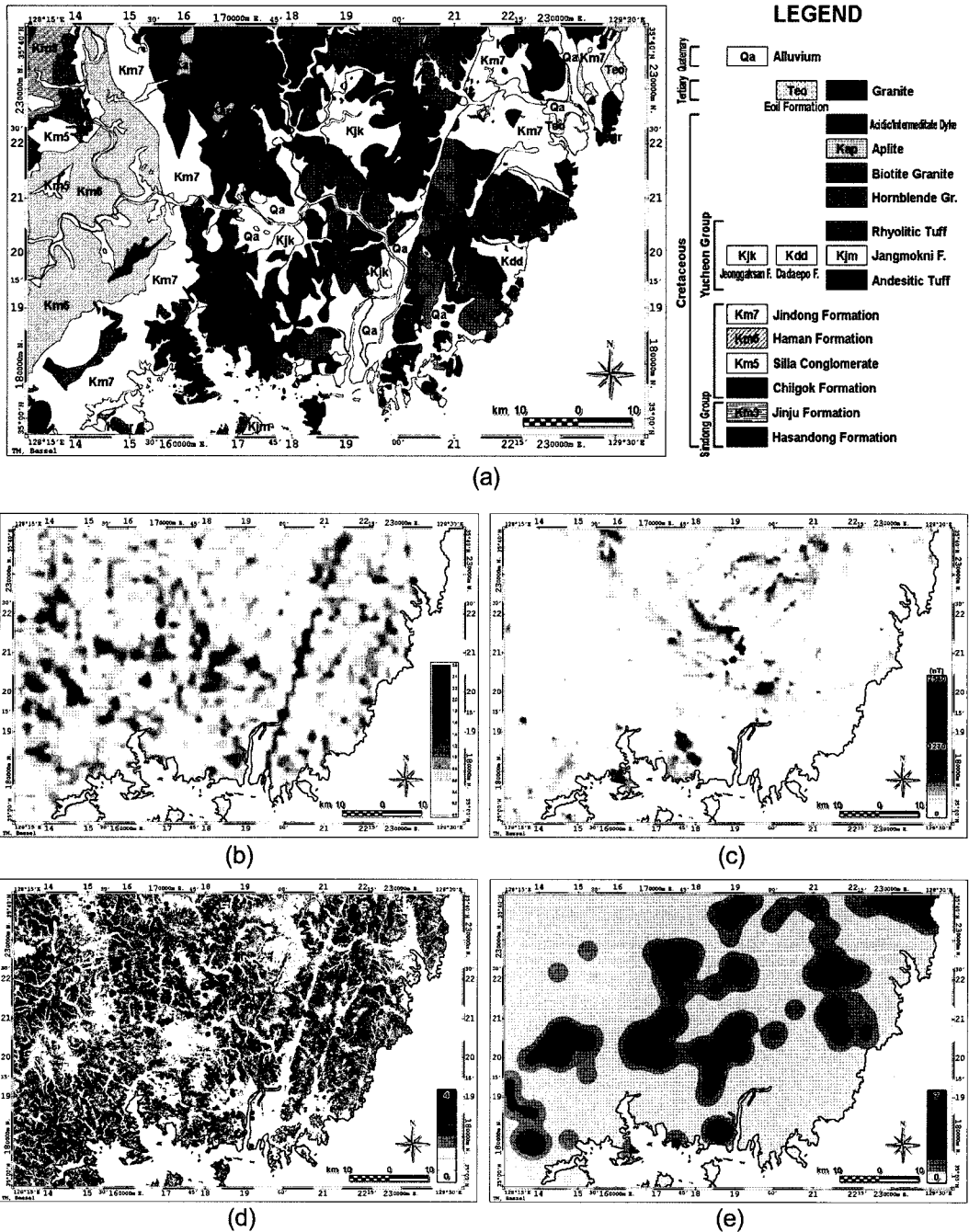


Fig. 2. Thematic maps for fuzzy logic based data integration. (a) geological map, (b) density of lineaments, (c) aerial magnetic intensity, (d) hydrothermal alteration zone from Landsat TM, and (e) density of epithermal ore deposits.

4.1. 지질도

지질도는 1:250,000 부산도폭(Kim, 1998)을 이용하여, 중생대 백악기 신동충군(하산동층, 진주층), 하양층군(칠곡층, 신라역암, 함안층, 진동층), 유천충군(경자산

층, 대애포층)에 속하는 퇴적암류와 화산암(안산암질층회암, 유문암질층회암, 산성화산암), 화강암(각섬석화강암, 흑운모화강암, 반암류, 화강암), 맥암(산성맥암류, 중성맥암류)과 제3기의 어일층군, 제4기 충적층 등 총 20

클래스로 구분하여 범주형 자료(thematic data)로 작성하였다(Fig. 2a).

4.2. 선구조 분포 밀도

선구조(lineaments)는 지각구조를 반영하는 직선 또는 완곡의 지형요소로서 단층, 절리, 파쇄대, 암맥, 지층경계, 습곡 등과 같은 구조적 불연속면과 연관되므로(Sabins, 1978), 지구조 운동의 규명, 일반지질 연구, 광물탐사 연구, 자연재해 예측 연구, 수리지질 연구 등과 관련된 자료의 해석 및 분석단계에서 중요한 역할을 한다(Lee and Chi, 1995). Vrouzi(1985)는 열전달 매체인 물이 지하심부로 들어가 심부 지열을 얻어 상부로 올라올 수 있는 지하수의 순환체계가 있어야 하며, 투수성이 우수한 단층대 및 파쇄대와 같은 지질구조와의 관계가 중요하다고 하였다. 따라서 이 연구에서는 연구지역의 선구조를 분석함으로써 지질구조선에 의한 지하수의 공급과 이와 관련된 지열수 부존 범위의 연관성을 파악하고자 하였다.

이를 위해 수치표고모형(DEM) 자료(해상도 30 m)로부터 작성한 음영기복도를 이용하여 연장길이가 1 km 이상 되는 총 814개의 선구조를 추출하였으며, 주 선구조군의 방향은 N10~30°E로서, 경상분지에 발달한 주요 단층들과 일치하였다. 선구조의 분포밀도도는 영향반경(buffering)을 1.5 km로 하여 작성하였다(Fig. 2b). 계산된 밀도는 0~2.6 범위를 나타내어 0.2 간격으로 13클래스로 재분류하여 범주형 자료(thematic data)로 작성하였다.

4.3. 항공자력도

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

이 연구에서는 항공자력탐사 자료를 이용하여 경상분지의 화산활동과 관련된 지질구조를 추정함으로써 지열 부존 가능성 및 온천과의 상관관계를 파악하고자 하였다. 이를 위해 한국자원연구소에서 발행한 1:250,000 축척의 부산 자력이상도(KIGAM, 1994)를 수치입력(digitizing)하고 이를 래스터데이터로 변환하여 주제도를 작성하였다(Fig. 2c). 이 때 주제도에서의 대자율이

0~2,540 nT의 범위를 나타내었고, 정보손실을 최소화하기 위하여 연속형 자료(continuous data)로 작성하였다.

4.4. 열수변질대 추출

Landsat TM(Thematic Mapper) 위성영상자료는 가시광선-근적외선-열적외선 영역에 걸쳐 세분된 7개 파장대의 밴드(band)로 구성되는데, 이중 1.55~1.75 μm (밴드 5)과 2.08~2.35 μm (밴드 7) 파장대는 암석분포 및 변질대의 구분이 용이하며, 특히 밴드간 비연산처리(band ratioing)을 통하여 열수변질대 추출이 가능하다고 하였다(Hunt & Salisbury, 1970, Rowan *et al.*, 1977).

따라서 이 연구에서는 Landsat TM 자료로부터 열수변질대를 추출함으로써 현행 온천 분포와의 상관성을 파악하고자 하였다. 이를 위해 Landsat TM 자료의 밴드5/밴드7, 밴드3/밴드1, 밴드4/밴드3 비연산처리를 실시하였으며, 연산 결과 0~4의 범위를 나타내어, 0.5 간격으로 재분류하여 8 클래스의 범주형 자료(continuous data)로 주제도를 작성하였다(Fig. 2d).

4.5. 열수형 광상 분포

경상분지에는 후기 화산활동에 의한 광역적인 열수 변질 작용으로 다양한 열수 광상들이 분포하며, 이는 화석 열수계와 밀접한 연관성으로 가지므로, 이를 현행 온천 분포와의 상관성으로 파악하고자 하였다.

열수형 광상 분포는 등록광물 분포도(Choi *et al.*, 1996)로부터 고령토, 납석, 구리, 금, 철 등 등 화석열수계와 관련되는 금속 및 비금속 광상의 위치를 입력하고, 분포밀도가 근집화되는 최소거리를 산정하여 검색반경(buffering)을 5km로 하여 분포 밀도도를 작성하였다(Fig. 2e). 계산된 밀도는 0~7 범위를 나타내어 1 간격으로 8클래스로 재분류하여 범주형 자료(thematic data)로 작성하였다.

5. 결과 및 토의

지질도, 선구조 분포밀도도, 항공자력도, 열수변질대, 열수형 광상 분포밀도도 등 각 주제별 퍼지소속함수(Fuzzy membership function)를 그래프에 도시하여 기존 온천과의 상관성을 검토하였다. 지질도 퍼지소속함수는 백악기 하양층군의 진동층(Km7), 백악기 말의 각섬석화강암 및 흑운모화강암, 제3기의 어일층군 등이 0.5 이상으로 높게 나타났다(Fig. 3a). 진동층

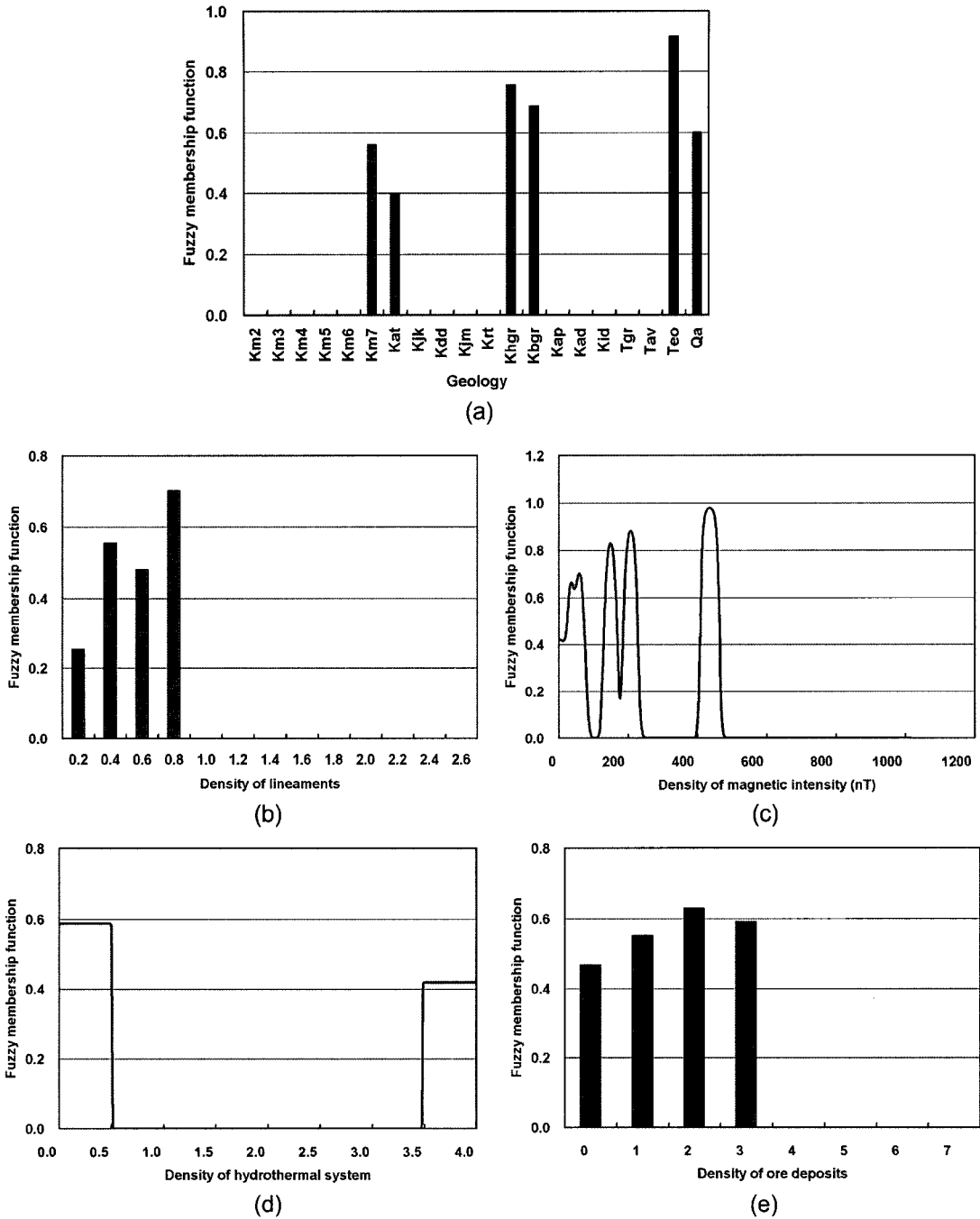


Fig. 3. Fuzzy membership functions for the spa. (a) geological map, (b) density of lineaments, (c) aerial magnetic intensity, (d) hydrothermal alteration zone from Landsat TM, and (e) density of epithermal ore deposits.

(Km7)은 주위에 각섬석화강암(Khgr) 및 흑운모화강암(Kbgr)이 분포하고 있어 이들의 관입 영향으로 판단되며, 특히 어일층군(Teo)이 0.9 이상의 가장 높은 상관성을 나타낸 것은 그 하부에 분포하는 가장 최근의 화

산암 및 화강암류(Tgr)의 분출 및 관입 영향으로 판단된다. 우리나라의 지열류량은 상대적으로 볼 때 퇴적암에서 높고, 암석 연대가 젊을수록 높으며, 화강암의 분포와는 뚜렷한 상관성을 보이지 않는다. 지열류량이

퇴적암류가 분포하는 지역에서 높은 이유는 지하심부의 열이 방출되는 것을 막는 덮개암으로의 역할을 하기 때문인 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2004).

선구조에서는 분포밀도가 높은 구간에서는 퍼지소속함수가 나타나지 않았으나, 0.8 이하의 낮은 분포밀도에서 밀도가 증가할수록 퍼지소속함수도 증가하는 경향을 보였다(Fig. 3b). 선구조는 지하수 순환이 심부가

지 잘 이루어지는 지열 전달 매체이므로 선구조 분포 밀도와 밀접한 상관관계가 예상되었으나, 높은 분포밀도에서 퍼지소속함수가 나타나지 않는 것은 기온입력 자료인 온천의 수가 적거나 실질적인 온천으로 볼 수 없는 자료가 포함되었기 때문으로 판단된다. 항공자력도에서는 대자율 값이 500 nT 이하에서 퍼지소속함수가 높게 나타나는데(Fig. 3c), 일반적으로 대자율이 낮

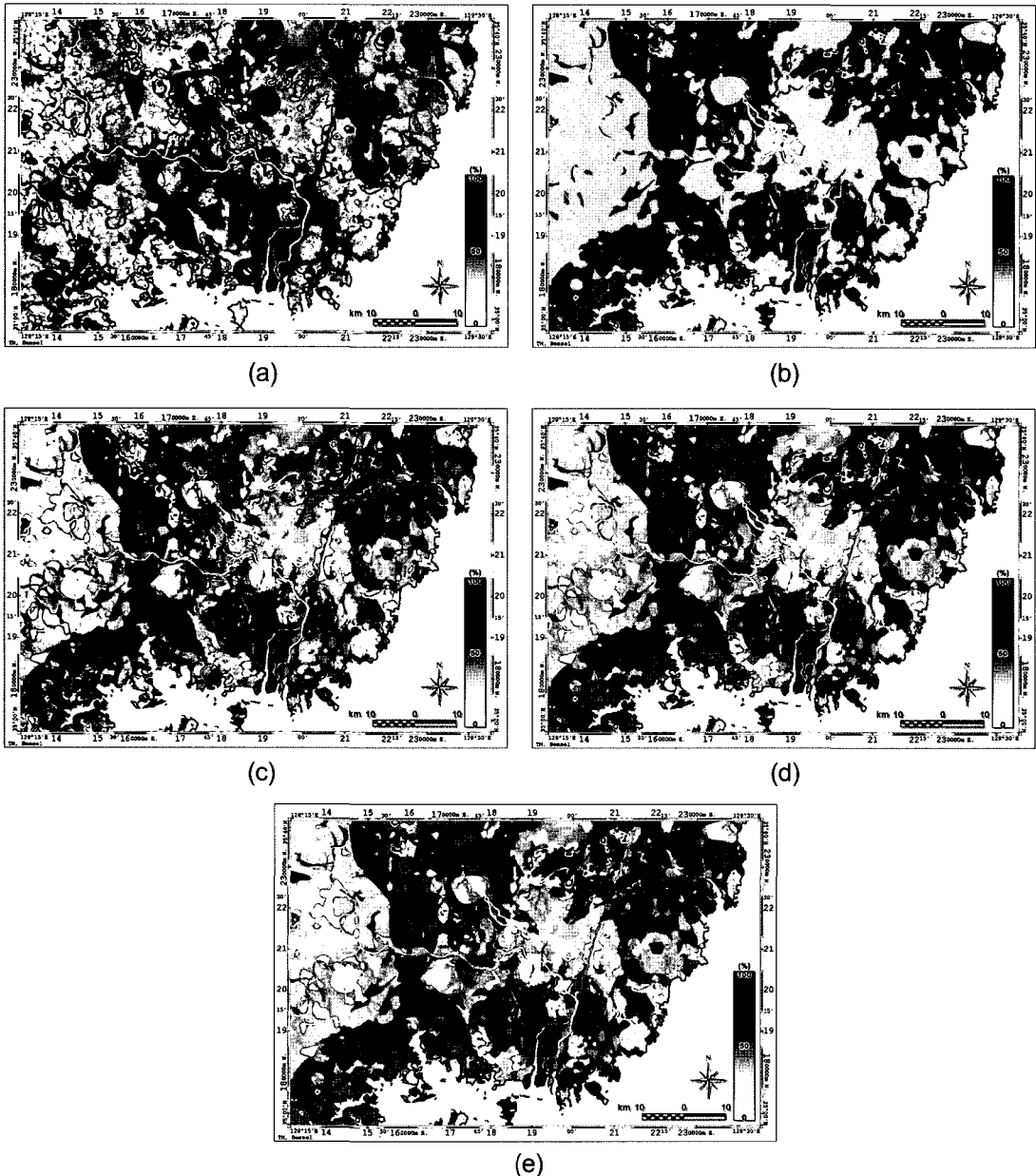


Fig. 4. Fuzzy integraion results using (a) maximum operator, (b) minimum operator, (c) algebraic sum operator, (d) algebraic product operator, and (e) gamma operator ($\gamma=0.1$).

은 지역은 지질구조, 단층, 파쇄대와 관련되므로, 구조대를 따른 마그마 관입 및 지하수 공급의 영향으로 판단된다. Landsat TM 자료로부터 추출한 열수변질대에서는 퍼지소속함수가 일부 구간(0.5 이하, 3.5 이상)에서만 0.4 이상으로 나타나고 있어 온천 분포와의 상관성을 해석하기가 곤란하였다(Fig. 3d). 이는 위성영상 자료에서 식생(vegetation)의 영향으로 열수변질대 추출 지역이 전체 연구지역에 비하여 매우 협소하여 상관성 분석이 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 열수형광상에서도 3 이하의 분포밀도가 낮은 구간에서 밀도가 증가할수록 퍼지소속함수도 증가하는 경향을 보였다(Fig. 3e). 열수형 광상은 화석열수계와 직접적인 연관성을 가지므로 열수형광상 분포밀도와 밀접한 상관관계가 예상되었으나, 높은 분포밀도에서 퍼지소속함수가 나타나지 않는 것은 선구조 분포밀도의 경우와 동일한 이유인 것으로 판단된다.

퍼지소속함수들을 결정한 후 최대연산자, 최소연산자, 산술합연산자, 산술곱연산자, γ 연산자($\gamma=0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 0.9$)를 각각 사용하여 통합한 결과를 서로 비교하였다. 최대 연산자의 경우 연구지역 여러 곳에서 현저히 높은 지열 부존 가능성을 나타내었다(Fig. 5a). 이러한 결과는 지질도의 각섬석화강암(Khgr) 지역에서 온천 분포수가 상대적으로 많아서 퍼지소속함수가 높게 나타났고 최대 연산자를 통해 그 효과가 부각된 것이다. 최소 연산자의 경우, 연구지역 서부와 중부의 넓은 지역에서 낮은 지열 부존 가능성을 나타내고 있다(Fig. 4b). 이는 지질도상에서 진주층(Km3), 칠곡층(Km4), 신라역암(Km5), 함안층(Km6), 정각산층(Kjk), 유문암질용회암(Krt) 지역으로 온천이 분포하지

않아 상대적으로 퍼지소속함수가 낮게 나타났고, 최소 연산자를 사용함으로써 지열 부존 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. 4c, 4d, 4e). 특히 최대 연산자와 최소 연산자에서 특정 클래스의 부각효과는 γ 값에 따라 절충되어 나타났다.

퍼지 연산자 각각에 대한 통합 결과와 통합에 사용한 온천 위치에 대한 적합성을 정량적으로 평가하기 위하여 Chung and Fabbri(1999)에 의해 제안된 성공비율곡선(success rate curve)을 작성하였다(Fig. 5a). 성공비율곡선에서 x축은 클래스값을 나타내며, y축은 x축에 해당하는 클래스 안에 포함되는 온천 발견 위치의 누적비율을 나타낸다. 만약 온천 위치에 대한 설명능력이 좋다면 적은 면적을 차지하는 상위 클래스에서 온천 발견 위치의 포함 비율이 높을 것이기 때문에 그래프는 좌상단으로 치우친 형태를 나타내게 된다.

5가지 연산자 중 연산자($\gamma=0.1$)를 이용한 통합 결과가 가장 높은 성공비율을 나타내었는데, 연구지역에서 지열부존가능성이 높은 상위 10%에 해당되는 면적에 대하여 63%의 온천 위치가 포함되는 것으로 나타났다(Fig. 5b). Fig. 6은 연산자($\gamma=0.1$)를 사용하여 통합한 결과 위에 온천 위치를 중첩한 것이다. 80% 이상의 높은 성공비율을 나타내는 진회색 지역에 온천 발견 위치가 표시된다. 특히 Fig. 6에서 검은색은 성공비율이 99% 이상인 지역으로 지열수 부존 가능성이 높음을 의미하며, 현재의 온천 위치인 부산과 마산 지역 외에 일부 지역에서 검은 색 지역이 나타나므로 새로운 지열수 부존 가능성이 예상된다.

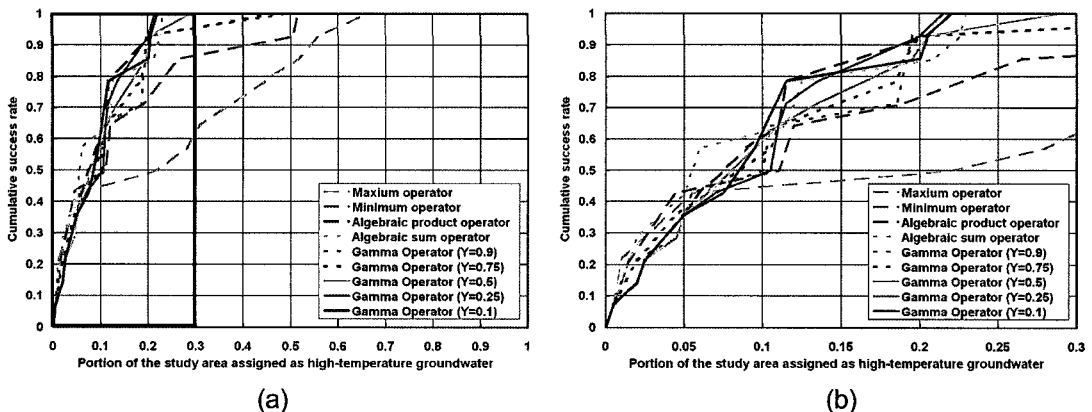


Fig. 5. (a) Success rate curves of geothermal potential mapping by fuzzy set operators. The black rectangle area has been enlarged and is shown in (b).

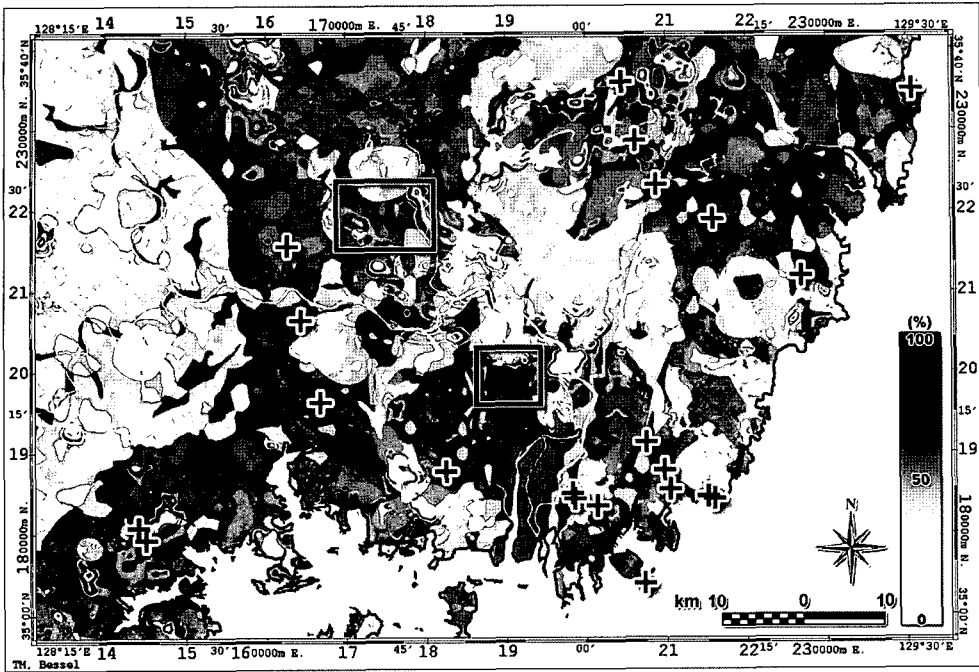


Fig. 6. Overlay of hot springs on fuzzy integration result using gamma operator ($\gamma=0.1$).

Kim(1984)은 한반도 지열류량 분포는 양산단층 동쪽이 서쪽에 비해 높은 것으로 보고하였고, Park and Park(2004)은 포항지역을 중심으로 대체적인 지온경사도가 $50^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 이상이며, 암석의 큐리온도를 550°C 로 가정할 때 마산-창원지역의 지온경사도는 약 $49^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 로 추정하여(Park and Park, 2004), 경상분지 남부의 화성활동 중심지가 밀양·지역과 함께 마산, 창원지역으로 이루어졌을 가능성을 제시하였다. 이는 공간통합결과와 잘 일치하는 것으로 판단된다.

6. 결 론

이 연구에서는 지질 분포, 선구조 밀도, 자력, 열수 변질대, 천열수형 광상 분포를 이용하여 주제도를 작성하고, 지질정보 사이의 통계적 관계를 이용한 퍼지 기반의 GIS 통합기법을 적용함으로써 경상분지 동남부 지역의 지열 부존 가능지역을 추출하였다.

퍼지소속함수에 의한 온천 발견 위치와의 상관성을 분석한 결과 지질도에서는 화강암류와 이들의 관입 영향으로 이에 인접한 일부 퇴적층에서 퍼지소속함수가 높게 나타났다. 선구조 에서는 분포 밀도가 낮은 구간에서 밀도가 증가할수록 퍼지소속함수도 증가하는 경향을 나타내었으나, 높은 분포밀도에서는 퍼지소속함수

가 나타나지 않았다. 이는 기준입력자료인 온천의 수가 적거나 실질적인 온천으로 볼 수 없는 자료가 포함되었기 때문으로 판단된다. 항공자력도에서는 대자율이 낮은 지역에서 퍼지소속함수가 높게 나타났으며, 지질 구조, 단층, 파쇄대와 관련된 구조대를 따른 마그마 관입 및 지하수 공급의 영향으로 판단된다. 열수형 광상에서는 분포밀도가 낮은 구간에서 밀도가 증가할수록 퍼지소속함수도 증가하는 경향을 나타내었으나, 높은 분포밀도에서는 퍼지소속함수가 나타나지 않는 것은 선구조 분포밀도의 경우와 동일한 것으로 판단된다.

최대, 최소, 산술합, 산술곱, γ 등 5가지 퍼지 연산자를 적용한 통합결과에서 γ 연산자($\gamma=0.1$)가 가장 높은 성공비율을 보였으며, 현재의 온천 위치 외에 일부 지역에서 새로운 지열수 부존 가능성이 예상된다.

향후 연구에서는 시추자료, 심부물리탐사자료 등과의 복합해석이 필요하며, 지화학 열평형 모델링 연구를 병행하거나 지온경사율 자료 등의 주제도를 추가하여 통합공간분석을 실시할 경우보다 정확한 지열 부존 잠재력 탐사가 이루어질 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 2003년도 동원학술연구재단의 지원에 의

하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 이 논문에 대해 세밀한 조언을 해주신 심사위원님들께도 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- An, P., Moon, W.M., and Rencz, A., 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.
- Baek, S.G. and Park, M.E. (2005) Geothermal potential mapping in Jeju Island using fuzzy logic based data integration. *Korean Jour. Remote Sensing*, v. 21, p. 99-111.
- Bohham-Carter, G.F., Agterberg, F.P. and Wright, D.F. (1988) Integration of geological data sets for gold exploration in Nova Scotia. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 54, p. 1585-1592.
- Burrough, P.A. and Macdowell, R.A., 1998. Principles of geographical information systems. *Natural Resources Research*, v. 10, 125-136.
- Chang, C.C. (1970) Heat flow of Korea. *Geology and ore deposit*, No. 10, Geological Survey of Korea, p. 23-29.
- Choi, G., Lee, G.H. and Cho, Y.S. (1996) Distribution map of mining rights in South Korea. *Korea Institute of Geology, Mineral and Materials*, 474p.
- Choi, S.W., Moon, W.M., and Choi, S.G. (2000) Fuzzy logic fusion of W-Mo exploration data from Seobyeogri, Korea. *Geosciences Journal*, v. 4, p. 43-52.
- Chung, C.F. and Fabbri, A.G. (1999) Probability prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 65, p. 1389-1399.
- Duda, R.O., Hart, P., and Nilsson, N., 1976. Subjective Bayesian methods for rule-based inference systems. *Proceedings of the 1976 National Computer Conference*, 1075-1082.
- Han, J.H., Kwak, Y.H., Son, J.D. and Son, B.K. (1987) Tectonic evolution and depositional environments of the Tertiary sedimentary basin, southeastern part of Korea. *Korea Institute of Energy and Resources*, KR-86-2-(B)-4, 109p.
- Han, W. and Chapman, D.S. (1985) On the regional heat flow around Korea and reduced heat flow. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 21, p. 74-78.
- Hunt, G.R. and Salisbury, J.W. (1970) Visible and near infrared spectra of minerals and rocks I, Silicate minerals. *Modern Geology*, v. 1, p. 283-300.
- KIGAM (1994) Map of total magnetic intensity of Busan sheet: Scale 1:250,000. *Korea Institute of Geology, Mineral and Materials*.
- Kim, D.H., Hwang, J.H., Park, K.H. and Song, K.Y. (1998) Explanatory note of the Busan sheet: Scale 1:250,000. *Korea Institute of Geology, Mining and Materials*, 61p.
- Kim, H.C., Lee, S. and Song, M.Y. (2002) Relationship analysis between lithology, geological time and geothermal gradient of South Korea. *Econ. Environ. Geol.*, v. 35, p. 163-170.
- Kim, H.C., Lee, S. and Song, M.Y. (2004) Geological characteristics and heat flow relationship in South Korea. *Econ. Environ. Geol.*, v. 37, p. 391-400.
- Kim, I.S. (1992) Origin and tectonic evolution of the East Sea (Sea of Japan) and the Yangsan Fault System: A new synthetic interpretation. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 28, p. 844-109.
- Kim, J.S., Kim, J.S. and Son, M. (2002a) Geochemical study of dyke swarms, SE Korea. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v. 11, p. 182-199.
- Kim, J.S., Son, M., Kim, J.S. and Kim, I.S. (2002b) Tertiary dyke swarms and their tectonic importance in the Southeastern Part of the Korea Peninsula. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v. 11, p. 169-181.
- Kim, J.S., Son, M., Kim, J.S. and Kim, J.M. (2005) ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of the Tertiary dike swarm and volcanic rocks, SE Korea. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v. 14, p. 93-107.
- Kim, K.H. and Choi, H.J. (1998) A geochemical study on the thermal water and groundwater in the hot spring area, South Korea. *Jour. Korean Earth Science Society*, v. 19, p. 22-34.
- Kim, S.K. (1984) Some consideration on heat flow in Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 17, p. 109-114.
- Lee, K.S. and Chung, J.I. (1997) Stable isotopic variation of precipitation in Pohang, Korea. *Econ. Environ. Geol.*, v. 30, p. 321-325.
- Lee, K.W., and Chi, K.H. (1995) Spatial integration of multiple data set regarding geological lineaments using fuzzy set operation. *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*, v. 11, p. 49-60.
- Lee, S.Y., Choi, S.G., So, C.S., Ryu, I.C., Wee, S.M. and Heo, C.H. (2003) Base-metal mineralization in the Cretaceous Gyeongsan Basin and its genetic implications, Korea: the Haman-Gunbug-Goseong(-Changwon) and the Euseong Metallogenic Provinces. *Econ. Environ. Geol.*, v. 36, p. 257-268.
- Lim, J.U., Kim, H.C. and Yum, B.W. (1989) Regional pattern of heat flow in the Korean Peninsula. *Korea Institute of Energy and Resources*, KR-89-(B)-12, 61p.
- Moon, W.M. (1998) Integration and fusion of geological exploration data: a theoretical review of fuzzy logic approach. *Geoscience Journal*, v. 2, p. 175-183.
- Park, I.S. and Park, J.N. (2004) A study to presume the Curie point depth and geothermal flow mechanism over the Gyeongsang Basin. *Jour. Korean Soc. Geosystem Engineering*, v. 41, p. 218-227.
- Park, N.W., Chi, K.H., Chung, C.J.F. and Kwon, B.D. (2003) GIS-based data-driven geological data integration using fuzzy logic: Theory and application. *Econ. Environ. Geol.*, v. 36, p. 243-255.
- Rowan, L.C., Goetz, A.F.H. and Ashley, R.P. (1977) Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near-infrared multispectral images. *Geophysics*, v. 42, p. 522-535.
- Sabins, Floyd F., Jr. (1978) *Remote sensing - Principles and interpretation*. W.H. Freeman and Company, USA.

- Sang, K.N. (1992) Genesis of kaolin-pyrophyllite deposits in the Youngnam Area. Jour. Korean Inst. Mining Geol., v. 25, p. 101-114.
- Son, M. (1998) Formation and evolution of the Tertiary Miocene Basins in Southeastern Korea: Structural and paleomagnetic approaches. Pusan National University, Ph.D. Thesis, 233p.
- Song, Y.H. *et al.* (2004) Development of deep, low-enthalpy geothermal energy. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, KR-2004-01, 266p.
- Um, S.H., Lee, D.W. and Park, B.S. (1964) Explanatory text of the geological map of Pohang sheet: Scale 1:50,000. Geological Survey of Korea. 21p.
- Vrouzi, F. (1985) Research and development of geothermal resources in Greece. Resent status Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, VDI4640, 43p.
- Yoon, S. (1991) Geologic events of the Tertiary Yangnam and Pohang basins, Korea: With a remark on the origin of the Yamato basin of the Japan Sea. Saito Ho-on Kai Spec. Pub., v. 3, p. 303-309.
- Yoon, S. (1997) Miocene-Pleistocene volcanism and tectonics in southern Korea and their relationship to the opening of the Japan Sea. Tectonophysics, v. 281, p. 53-70.
- Yoon, S., Chang, K.H., You, H.S. and Lee, Y.G. (1991) Tectonic history of the Tertiary basins of the Southern Korean Peninsula. Jour. Korean Inst. Mining Geol., v. 24, p. 301-308.
- Zadeh, L.A. (1978) Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. Fuzzy Sets and Systems, v. 1, p. 3-28.
- Zimmerman, H.J. (1984) Fuzzy set theory and its applications. Kluwer-Nijhoff Publishing, Boston, 357p.

2007년 1월 4일 원고접수, 2007년 6월 23일 게재승인.