

## 시계열 수질 분석에 의한 제주도의 해저용출수 탐사 및 검증

백승균\* · 박맹언

부경대학교 환경지질학과

### Exploration and Verification of Submarine Groundwater Discharge on Jeju Island by Remotely Sensed Based Water Quality Analysis

Seung-Gyun Baek\* and Maeng-Eon Park

Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

To explore submarine groundwater discharge (SGD) into the coastal zone of Jeju Island, the water quality analysis with seasonal remotely sensed data was carried out. If the groundwater is directly discharged into the ocean, the water quality of coastal zone is influenced. Therefore sea surface temperature (SST), the transparency, and Chlorophyll-a's concentration were analyzed for extracting the anomaly zone related with SGD using Landsat Thematic Mapper (TM) data acquired on April, August, and December. Then the spatial characteristics of springs, which located along the coastal area, were analyzed by GIS data integration based on Fuzzy logic. The integration results were compared with the anomaly zone extracted from Landsat TM data, and it is considered that springs has close relationship with SGD.

**Key words** : submarine groundwater discharge (SGD), spring, Landsat TM, Fuzzy logic, Jeju Island

새로운 수자원으로서의 가능성이 대두되는 제주도 연안의 해저에 존재하는 용출수의 위치를 파악하기 위해 원격탐사 자료와 GIS 기법을 적용하였다. 4월, 8월, 12월에 촬영된 Landsat TM 자료를 이용하여 해수면 온도, 투명도, 클로로필-a 분포 특성을 분석함으로써 제주도 연안 해저의 용출수와 관련된 이상대를 파악하였다. 또한 지질도, 수계분포도, 분석구 분포 밀도도, 선구조 분포 밀도도, 지하수위도 등의 주제도를 이용한 퍼지기반 공간통합분석을 실시하여 제주도 해안에 주로 분포하는 용출수의 분포 특징을 분석한 결과 Landsat TM 자료 분석 결과와 밀접한 상관관계를 나타내었다.

**주요어** : 해저용출수, 용천수, Landsat TM, 퍼지로지, 제주도

### 1. 서 론

제주도는 과거로부터 물이 부족하여 서부와 동부의 중산간 지역에서는 봉천수(뽕물)나 멀리서 길어온 용천수를 주로 이용하였다. 이러한 용수문제 해결을 위해 1970년대 이후 정부 지원 하에 지속적인 지하수 개발 사업이 이루어졌고 큰 성과를 거두었다. 그러나 최근 일부 해안지대에서는 집중적인 지하수 개발로 인하여 수위 강하, 염수 침입 및 수질 오염 등의 문제가 발생하고 있다(제주도, 2000).

제주도의 수자원 조사(제주도, 2000a, 2000b, 2002; 제주도, 한국수자원공사, 2003)에 의하면 매년 총강수량의 45.8%에 해당하는 막대한 양이 지하수로 함양되고 있으나 지하수 개발이나 용천수로 유출되는 양은 이보다 훨씬 적은 것으로 보고되었다. 따라서 불수지 균형을 고려해볼 때 연안 해저로의 지하수 유출 가능성이 높으며, 심부의 피압된 지하수가 구조선을 따라 해저로 유출될 경우 해안저지대의 지하수나 용천수에 비해 오염이 적고 수량이 풍부할 것으로 예상되며, 수자원으로서 가능성이 제기된다.

\*Corresponding author: sgbaek@mail1.pknu.ac.kr

최근 외국에서는 해저용출수에 대한 활발한 연구가 이루어지고 있다. Zektser *et al.* (1993)은 담수 지하수의 해저를 통한 유출량이 강물의 약 5-6%에 이한다고 하였고, Moore (1996)는  $^{226}\text{Ra}$  추적자를 이용하여, 미국 동부해역에서 재순환된 지하수를 포함하여 해저지하수의 유출량이 강물의 약 40%에 달한다고 보고하였다. 국내에서는 이상규(1994)가 제주도 지역에 대한 항공원격탐사 자료의 해수면 온도 분석에 의해 해저용출수 탐사를 처음으로 수행하였으며, 이대근 등(2002)은 거제 해안 지역의 위성영상 자료를 이용한 해수면 온도 분석으로 해안유출지하수 연구를 실시하였다. 두 연구에서는 특정시점의 해수면 온도 분석만을 적용하여 해저용출수 가능지역 추출을 시도하였으나 계절적인 해수면 온도와 함께 탁도, 미세조류의 성장 등 다양한 요인에 대한 복합적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

따라서 이 연구에서는 새로운 수자원으로서의 가능성이 대두되는 제주도 연안의 해저에 존재하는 용출 지하수의 위치를 파악하기 위해 원격탐사 자료와 GIS 기법을 적용한 해석을 시도하였다. 특히 Landsat TM 자료를 이용하여 해수면 온도, 투명도, 클로로필-*a* 농도 분석을 실시함으로써 해저용출수 가능지역을 추출하고자 하였다. 또한 주로 해안에 발달하는 용천수는 연안 해저까지 연장되어 분포할 가능성이 높기 때문에, 이들의 분포 특징을 파악하여 Landsat TM 자료 분석 결과와 대비하고자 하였다 이를 위해 지질도, 수계 분포도, 분석구 분포밀도도, 선구조 분포 밀도도, 지하수위도 등 용천수와 관련된 주제도를 작성하고 GIS 통합 기법을 적용하여 분포 특징을 분석하였다.

## 2. 연구지역 개관

제주도는 화산암류, 화산쇄설암이 주로 분포하고 일부 퇴적층이 용암류 사이에 협재되어 있다. 화산암류는 현무암, 조면현무암, 현무암질조면안산암, 조면안산암 및 조면암류로 분류된다. 제주도 동부와 서부에 분포하는 현무암은 분출 당시 점성이 낮아 넓은 지역을 피복하며 평활한 지형을 이루고 있다. 화산쇄설암 중 수성화산활동(hydrovolcanism)에 의한 경우는 주로 해안에 분포하고 잘 발달된 층리를 형성하며, 스트롬볼리형(Strombolian type) 분출의 경우는 분석구(cinder cone)를 형성하고 있다. 제주도 심부시추 결과(고기원, 1997)에 의하면 동부지역은 해수면하 120 m 두께의 용암류가 분포하고, 그 하부에는 약 120 m 두께의 퇴적

층이 분포하는 것으로 밝혀졌으며, 서부 지역의 용암류 두께는 50~70 m이고 하부에 서귀포층이 분포하는 것으로 밝혀졌다. 퇴적층 하부에는 중생대 기반암층으로 해석되는 용결용회암, 화강암 등이 분포한다.

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

제주도에 분포하는 900개 이상의 용천수는 산출지에 따라 중산간 지대 용천, 해안 용천, 해저용천으로 나눌 수 있다(제주도, 1999). 중산간 지대 용천은 고토양이나 용암분출물 중의 치밀질 암석을 따라서 용출하며 그 양이 많지 않고 강우에 민감한 영향을 받는다. 해안용천은 비교적 천부지하수가 수두경사를 따라서 하류로 이동하다가 해수와 만나는 지점에서 용출되는 것이다. 해저용천은 비교적 심부의 지하수가 수두경사의 차이로 어느 정도의 압력을 가지기 때문에 해저로 지하수를 용출시키는 것이다(제주도, 1999).

Burnett *et al.* (2001)에 의하면 해안에서 해저를 통해 유출되는 지하수의 형태를 자유면대수층(unconfined aquifer)을 통해 빠져나온 지하수가 해수와 혼합되면서 유출되는 경우와 지하수가 해저의 피압대수층(confined aquifer)을 통해 해양으로 직접 유출되는 경우로 분류하였다(Fig. 1). 제주도의 경우는 자유면대수층을 통해 주로 해안을 따라 유출되는 용천수와 용암류 및 서귀포층 내의 지질구조적인 피압대수층을 통해 해저로 직접 유출되는 지하수로 구분할 수 있다.

## 3. 연구방법

### 3.1. 수질 분석 방법

Landsat TM 위성영상의 열적외선 파장대인 6번 밴드(파장 10.4~12.5  $\mu\text{m}$ , 공간해상도 120 m)는 지표면 온도를 1~2°C까지 정확하게 감지할 수 있으며, 특히 수온에 적용할 때 매우 높은 상관성을 나타낸다(Lathrop and Lillesand, 1987). 제주도 연안 해저로 지하수가 지속적으로 용출되면 주변 수온과 차이를 나타내는 이상대를 형성하게 될 것이다. 따라서 이 연구에서는 해저 용출 지하수의 수온(평균 16°C)을 고려하여 해수면 온도가 이보다 높거나 낮은 시기인 1988년 8월 3일, 1991년 12월 2일과 2000년 4월 6일에 촬영

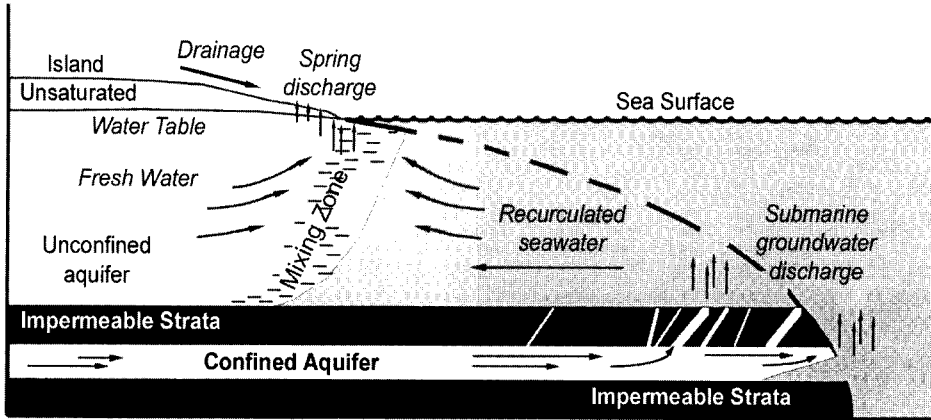


Fig. 1. General type of groundwater discharge in the coastal ocean. Modified from Burrett *et al.* (2001).

된 Landsat TM 위성영상 자료를 이용하여 해수면은 도 분석을 실시하였다.

Landsat TM 열적외선 밴드 자료를 이용한 해수면 온도 산출은 Quadratic 방법(Lathrop and Lillesand, 1987)을 이용하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$\text{Temp}(^{\circ}\text{K}) = 209.831 + 0.834 \text{ DN} - 0.00133 \text{ DN}^2 \quad (1)$$

여기서 DN은 화소값을 말한다. 산출된 값은 실제 온도와 차이가 있으므로 국립수산과학원에서 운영하는 제주도 연안의 22개 정점 해양환경측정망 자료를 이용하여 온도보정을 실시하였다.

제주도 연근해는 용천수의 영향으로 타지역보다 투명도가 매우 높은 것으로 알려져 있으나(윤정수 등, 1992), 수심이 얕기 때문에 해저면으로 지하수가 용출되면 부유물이 증가되어 저투명도 이상대가 형성될 것으로 예상된다. Suh *et al.* (2004)은 탁도 실측치와 SeaWiFS 위성영상 해색자료(0.490 μm/0.555 μm)는 상관성이 높으며 이를 통해 저투명도 영역 구분이 가능하다고 하였다. 따라서 이 연구에서는 Landsat TM의 Band1(0.485 μm)/Band2(0.565 μm) 밴드비 연산 결과를 이용하여 저투명도 이상대를 추출하였다.

클로로필-a(Chlorophyll-a)의 농도는 호수와 해양에서 부영양화와 적조 발생의 원인이 되는 조류 생체량의 지표로서 활용되고 있다. 클로로필의 흡수과장인 적색과장과 근적외선 파장은 실측치와 높은 상관성이 있으며(Stumpf, 1988; Catt, 1984), 다양한 위성영상 자료 중에서 특히 Landsat TM 3번 밴드 자료가 클로로필-a와 높은 상관성을 가지는 것으로 보고되었다(Jo *et al.*, 1999).

제주도 연안의 해저로 지하수가 지속적으로 용출되

면 염분도가 변하게 되며, 이로 인해 이 부근에 서식하는 미세조류의 성장 정도도 주변 해역과 차이를 나타낼 것으로 예측된다. 따라서 이 연구에서는 지역적인 차이는 있으나 Jo *et al.* (1999)이 제안한 식 (2)을 이용하여 클로로필-a 농도를 구하고 이상대를 추출하였다.

$$\text{Chlorophyll}(\mu\text{g/l}) = 0.0058 \times \text{DN3} - 18.929 \quad (2)$$

### 3.2. 용천수 분포특성 분석

제주도의 용암류는 대체로 100 m 정도의 두께를 가지며, 지역에 따라 차이가 있으나 해수면하 50 m 내외 심도까지 분포한다(제주도, 한국수자원공사, 2003). 제주도의 용천수는 66% 이상이 해안 저지대에 분포하고(Fig. 2), 산출형태는 90% 이상이 용암류경계형으로 조사되었다(제주도, 1999). 따라서 연안 해저에 분포하는 용암류에서도 경계면을 따라 지하수의 용출 가능성이 예상된다. 연안 해저로의 연장가능성이 예상되는 용천수의 분포 특징을 파악하기 위해 GIS 통합기법을 적용하였으며, 그 결과를 Landsat TM 자료 분석 결과와 비교하였다.

최근 활발한 연구가 이루어지고 있는 퍼지이론(fuzzy theory)을 도입한 GIS 통합 기법은 지질자료와 같이 엄격한 경계설정이 어렵거나 불확실한 정보를 효율적으로 다룰 수 있기 때문에 광물자원 탐사, 산사태 취약성 분석 등 적용 범위가 점점 넓어지고 있다(박노옥, 2003). 따라서 이 연구에서는 퍼지기반 공간통합(fuzzy logic based data integration) 분석을 적용하여 용천수의 분포특징을 파악하였다.

퍼지 이론에서는 퍼지소속함수(fuzzy membership function)를 이용하여 자료를 표현하는데, 지질자료를

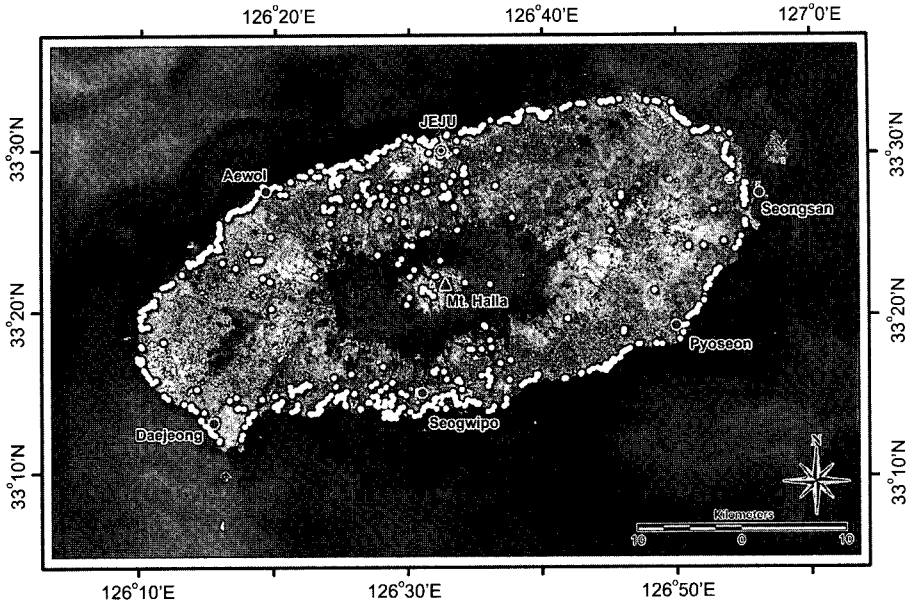


Fig. 2. Locations of the springs in Jeju Island.

Table 1. Fuzzy combination operators.

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

퍼지소속함수로 표현할 때 우도비(likelihood ratio)를 사용하는 방법은 다른 속성과의 상대적인 의미까지 내포하는 장점이 있다(박노옥 등, 2003). 어떤 사건이 특정 속성에서 일어나지 않을 확률에 대한 일어날 확률의 비로 정의되는 우도비( $\lambda$ )는 이러한 차이를 정량적으로 부각시킬 수 있는 장점이 있다(Duda *et al.*, 1976).

$$\lambda = P\{E_{ck}|T_p\}P\{E_{ck}|\bar{T}_p\} \tag{1}$$

여기서  $T_p$  와  $\bar{T}_p$  는 각각 “특정 화소 p에 용천수가 산출된다”와 “특정 화소 p에 용천수가 산출되지 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.

$$\mu_k = \lambda_k / (1 + \lambda_k) \tag{2}$$

여기서  $\mu_k$  와  $\lambda_k$  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(maximum), 최소(minimum), 산술합(algebraic sum),

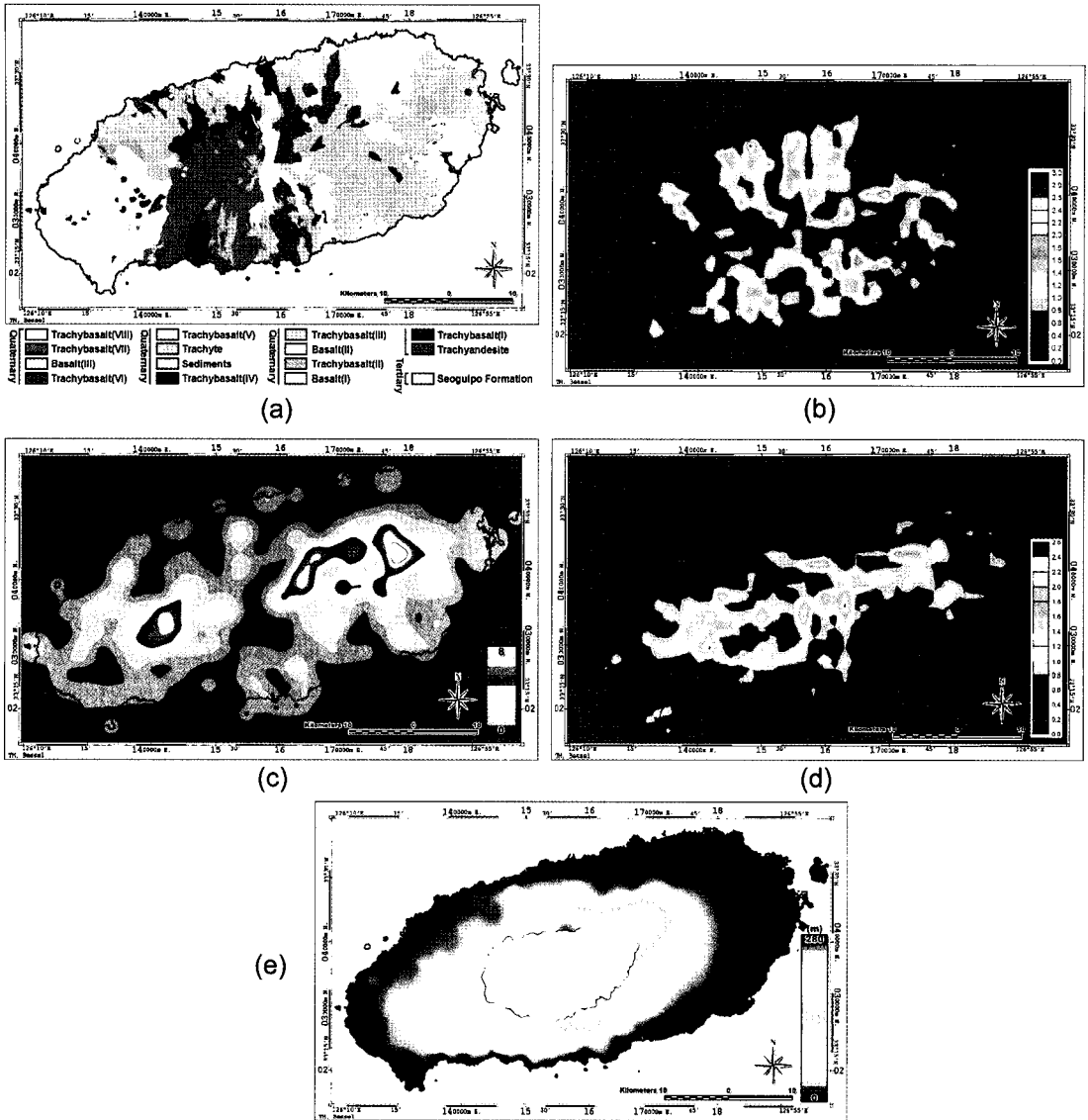


Fig. 3. Thematic maps for fuzzy logic based data integration. (a) geological map (SF : Seogwipo Formation, Qta : Trachyandesite, Qtb : Trachybasalt, Qb : Basalt, Qs : Sediments), (b) density of drainage system, (c) density of cinder cones, (d) density of lineaments, and (e) groundwater table.

산술곱(algebraic product),  $\gamma$  연산자 등이 있다(Table 1) (An *et al.*, 1991; Moon, 1998; Choi *et al.*, 2000).

용천수의 분포특성 분석을 위해 지질도, 수계분포도, 분석구 분포밀도도, 추정선구조 분포밀도도, 지하수위도 등의 주제도를 작성하고, 각 주제도 별 퍼지소속함수(fuzzy membership function)를 그래프에 도시하여 용천수와와 상관성을 검토하였다.

지질도는 한국자원연구소에서 발행한 1:250,000 제주도폭을 이용하여, 암종과 분출시기에 따라 퇴적암 2

종, 조면암, 조면안산암, 현무암 3종, 조면현무암 8종으로 구분하여 총 15 클래스의 주제도를 작성하였다(Fig. 3a). 수계분포도는 1:5,000 수치지도로부터 하천 레이어를 추출하고 영향 반경(buffer)을 1km로 하여 분포밀도도를 작성하였다(Fig. 3b). 분석구 분포밀도도는 1:5,000 수치지도로부터 작성한 5m격자의 음영기복도로부터 분석구의 위치좌표를 획득하고, 분포밀도도가 균집화되는 최소거리인 3km를 검색반경(search radius or buffer)으로 하여 밀도도를 작성하였다(Fig. 3c). 추

정 선구조는 1:250,000 제주도폭 설명서를 참고하여 82개의 선구조를 추출하고, 영향 반경을 2 km로 하여 분포 밀도도를 작성하였다(Fig. 3d). 지하수위분포도는 제주도 지하수자원 조사 보고서(제주도, 한국수자원공사, 2003)를 이용하여 작성하였다(Fig. 3e).

## 4. 결과 및 토의

### 4.1. 해수면온도

제주도 근해의 해수면 온도는 2~4월이 13~16°C로서 가장 낮고, 8~9월이 26~27°C로서 가장 높다(국립수산과학원, 1998). Landsat TM 4월 영상에서는 제주도 근해의 해수면 온도가 13~16°C 범위를 나타내었다. 영상을 분석한 결과 월정리 북부 해역에서 주변(13.5°C)보다 0.5~1°C 정도 낮으며, 폭 400 m, 연장 2km 정도의 저온대가 관찰된다(Fig. 4a). 시흥만과 성산만에는 주변 해역(13.5°C)보다 1.5°C 정도 낮은 저온대가 넓게 분포하며, 종달, 하도 연안을 따라 북쪽으로 약 6km 정도의 연장성을 보인다.

8월경 제주도 근해의 해수면 온도는 대체로 25~28°C 범위이며, 동일한 영상에 대한 이전 연구(원중선 등, 1998)의 분석결과에서는 22~28°C 범위를 나타내었다. 이를 적용한 해수면온도 분석에서는 제주도 서부의 비양도, 대정, 가파도, 마라도 인근 해역에 최대 연장 7km의 대규모 저온대가 관찰되는데, 현장 조사 결과 이 지역에 밀집 분포하는 대규모 양식장의 배출수 영향으로 확인되었다. 북부의 삼양, 조천, 함덕, 김녕, 월정, 행원 지역과 동부의 시흥, 하도, 성산 지역에 다양한 규모의 저온대가 관찰된다(Fig. 4b). 삼양과 행원지역의 저온대는 현장 조사 결과 용천수와 양식장 배출수 영향으로 확인되었다. 제주도 북부 해역은 4m/s 이상의 바람이 3일 이상 지속되어 발생하는 에크만용승(Ekman upwelling)이 빈번히 관찰되는 지역으로 알려져 있으나(Lee, 1983; 강태연 등, 1996), 위성영상 촬영 당시 제주도 북동부 지역의 풍속이 2.5m/s 내외이므로 용승 발생 가능성은 낮았다. 따라서 함덕과 월정지역에 분포하는 2°C의 수온차와 폭 2km의 대규모 저온대는 해저용출수 발달 가능성이 높다. 한편 서귀포 인근 해안선을 따라 10km 연장의 대규모 저온대(수온차 1~1.5°C)가 관찰되는데, 해안지역에 분포하는 용천수와 상시하천의 영향으로 판단된다.

12월경 제주도 근해의 해수면 온도는 16~19°C 범위를 보이는데, 해수면온도 분석에서는 제주도 북부의 제주, 삼양, 조천, 함덕, 김녕 지역에 주변 해역

(21.5°C)보다 최대 2°C 정도의 수온차를 나타내는 최대 1.3 km 연장의 저온대가 다수 관찰된다(Fig. 4c). 계절적으로 강수가 적어 하천수의 영향이 배제됨에도 불구하고 연안으로부터 외해로 뚜렷한 연장성을 나타내는 것으로 보아 해저용출수의 가능성이 높은 것으로 판단된다. 성산만에서는 최대 4°C 차이의 저온대가 관찰되는데, 지형적으로 해수순환이 적어 대기 영향에 의한 것으로 판단된다.

### 4.2. 투명도

영상 분석 결과 제주도 주변 해역은 연안지역의 투명도가 대체로 낮은 것으로 나타났다. 특히 제주도 동북부, 서북부 지역의 투명도가 더욱 낮게 나타났다. 투명도가 낮은 것은 부유물질이나 탁도가 높기 때문으로 생활하수의 유입, 양식장 배출수, 환경오염 등과 같은 요인이 있으나 이들이 영향이 적은 지역은 해저용출수의 가능성을 내포하고 있다.

2000년 4월 6일, 1988년 8월 3일, 1991년 12월 2일에 촬영된 계절별 영상을 판독한 결과 여름철인 8월 영상에서 낮은 투명도 영역이 가장 넓었다. 이러한 결과는 강우량이 집중되는 계절적인 영향이 큰 것으로 판단된다.

8월 영상에서 제주도 동북부의 조천리, 함덕리, 북촌리, 동김녕리, 월정리, 행원리, 한동리, 구좌읍, 하도리, 종달리, 시흥리, 성산읍, 신양리로 이어지는 연안 해역에 낮은 투명도 영역이 분포한다(Fig. 5a). 서북부의 애월읍, 한림읍, 비양도, 신창리의 해역에 뚜렷한 저투명도 영역이 관찰된다(Fig. 5b). 동남부 지역은 표선리 인근 해역을 제외하고는 저투명도 영역의 발달이 명확하게 구분되지 않는다(Fig. 5c).

제주도 동북부 지역은 수계의 발달이 빈약하기 때문에 하천 발달에 의한 투명도 감소 가능성은 낮다. 그러나 마을 인근 해역을 중심으로 저투명도 영역이 뚜렷하게 나타나는 것은 항구 발달에 의한 해양오염과 양식장의 배출수 영향으로 생각된다. 특히 하도리와 종달리에서는 현장 조사 결과 용천수를 이용한 양식장과 농사가 이루어지고 있어 이에 의한 영향으로 판단되며, 성산읍과 신양리는 만(bay)을 형성하고 있어 해수 순환이 원활하지 못하여 투명도가 낮게 나타나는 것으로 사료된다.

애월읍과 한림읍에는 각각 광지해수욕장과 협재해수욕장이 위치하고 있어, 해변에서의 파도에 의한 해수 중 부유물 증가가 투명도를 낮추는 것으로 판단된다. 현장 조사에서 한림읍은 항구 발달에 의한 해양오염으로 투명도가 낮게 나타나는 것으로 확인되었다. 비양

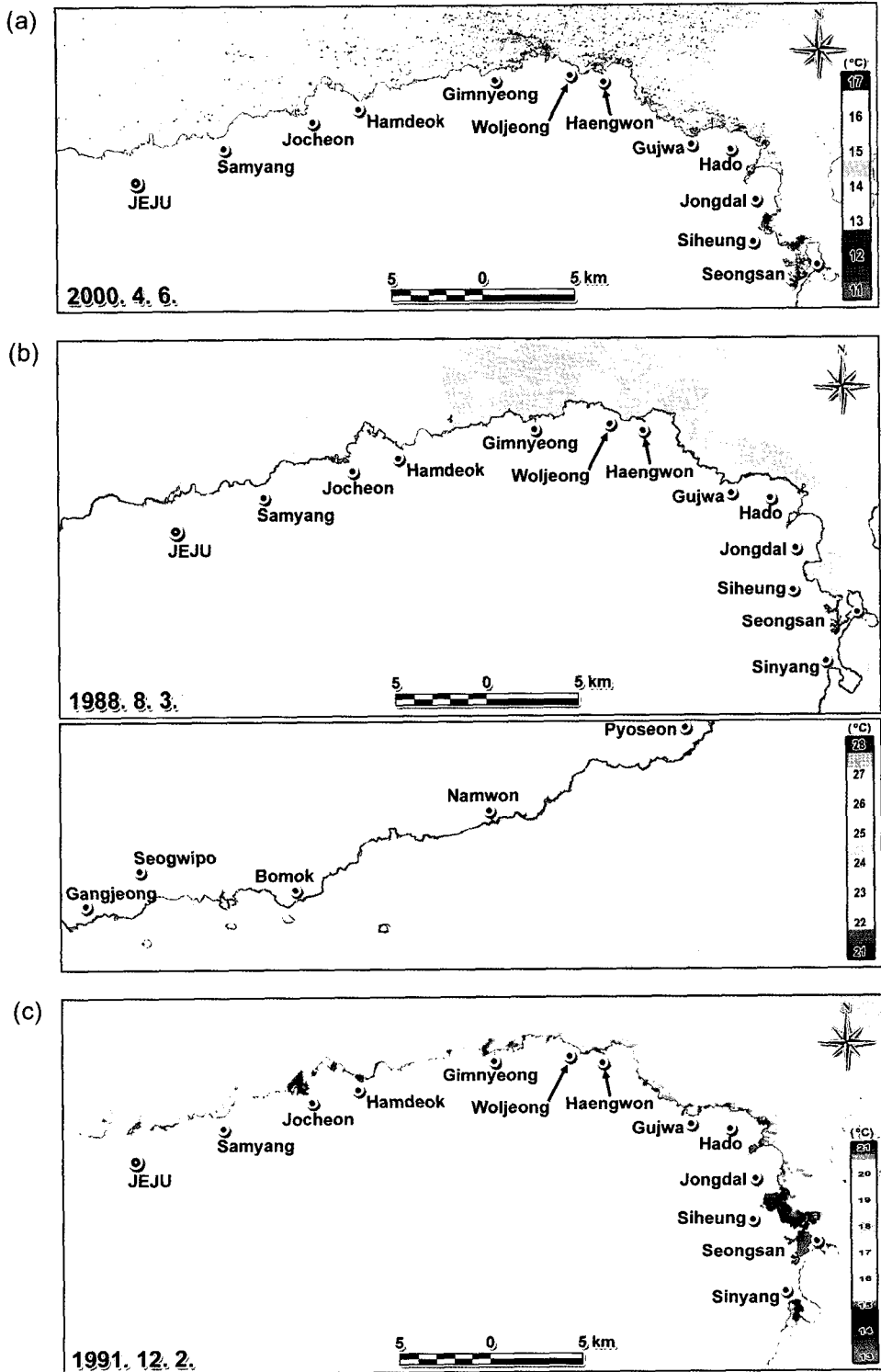


Fig. 4. Results of sea surface temperature analysis using Landsat TM images. (a) Northern east part (archived on 2004, 4. 6), (b) Northern east and South part (archived on 1988, 8. 3), (c) Northern east part of Jeju Island (archived on 1991, 12. 2).

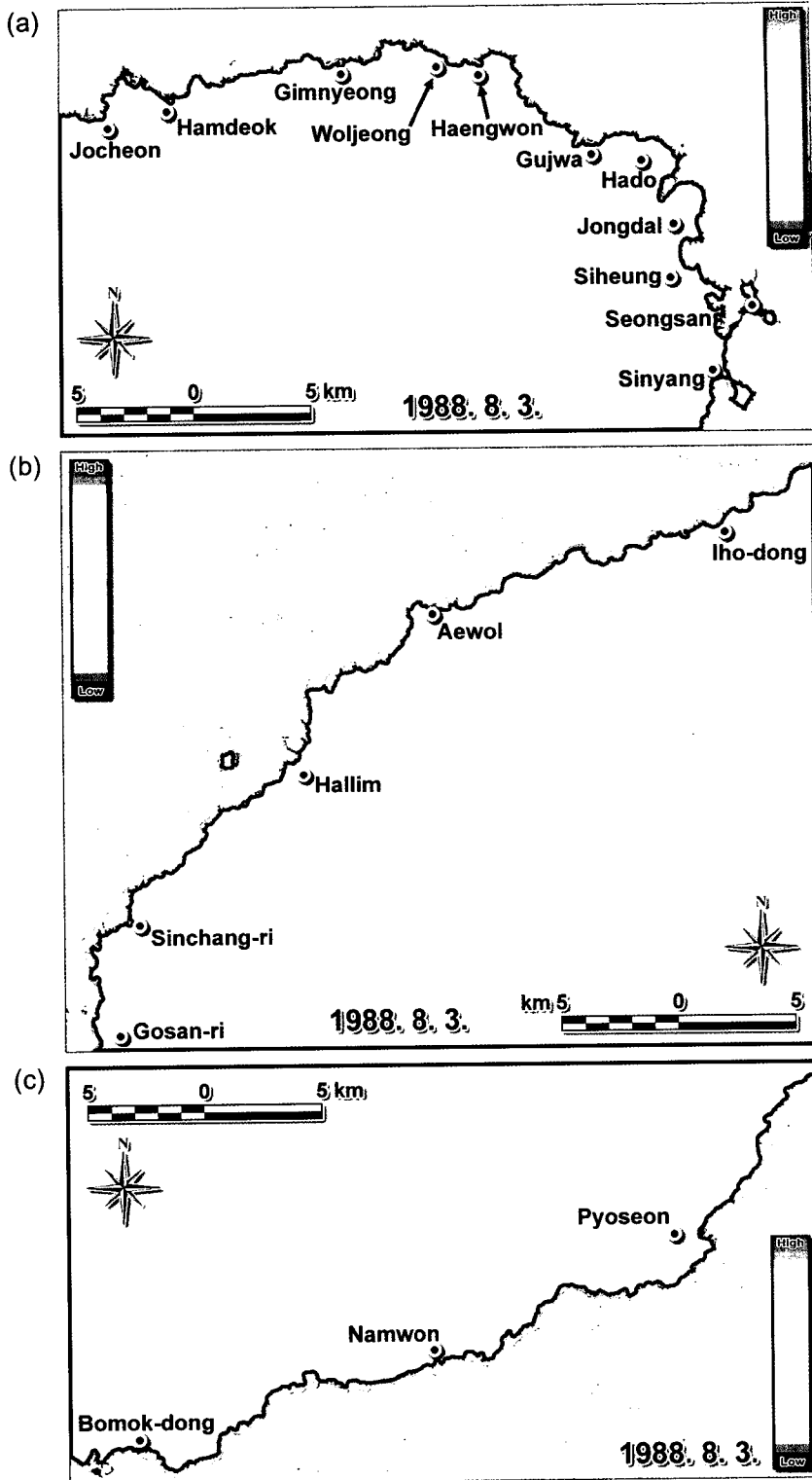


Fig. 5. Results of transparency analysis using Landsat TM images. (a) Northern east part, (b) Northern west part, (c) Southern east part of Jeju Island.



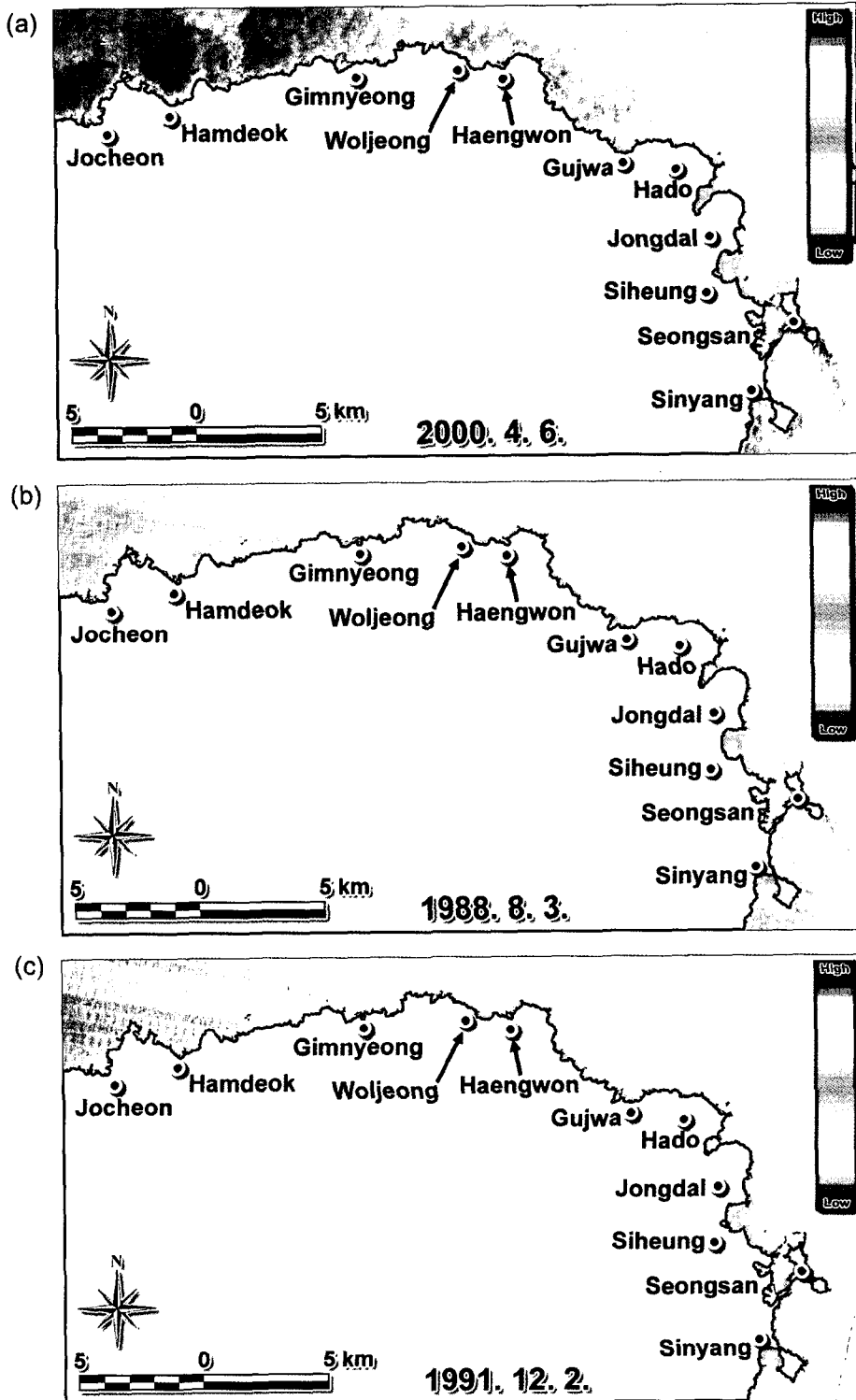


Fig. 6. Results of Chlorophyll-a analysis using Landsat TM Images (Focus on Northern East Part of Jeju Island). (a) Archived on 2000. 4. 6, (b) 1988. 8. 3, (c) 1991. 12. 2.

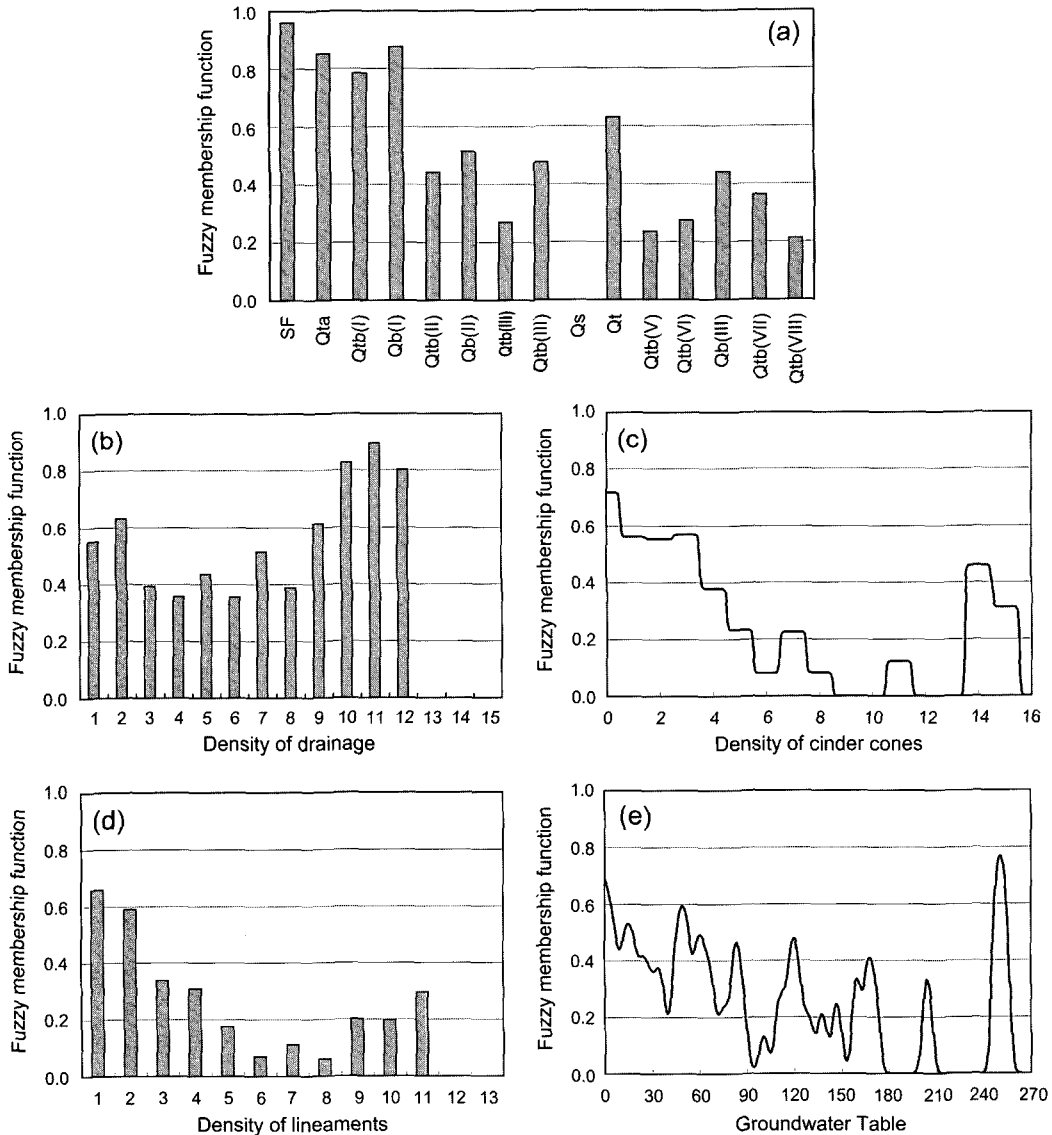
도 안쪽 해역과 고산리의 당산봉 인근 해역의 저투명도 영역의 분포는 수계나 생활하수, 양식장의 영향이 거의 없는 곳이어서 해저용출수의 가능성이 높다. 표선리 지역은 생활하수와 만 내에서의 해수순환이 원활하지 못하여 투명도가 낮은 것으로 판단된다.

**4.3. 클로로필-a 농도**

연상분석결과 제주도 동북부 지역에서 클로로필-a가 높은 영역이 관찰된다. 계절적인 변화는 크지 않으며

해안으로부터의 분포 범위도 넓지 않다. 특히 제주도 동북부를 제외하고는 클로로필-a가 주변 해역에 비해 상대적으로 큰 차이를 갖는 이상대는 구분되지 않았다.

클로로필-a가 높은 지역은 함덕리, 동김녕리, 구좌읍, 하도리, 종달리, 신양리로서 저투명도를 나타내었던 지역과 대체로 일치한다(Fig. 6a, 6b, 6c). 하천, 용천수, 해저용출수 등 담수의 유입은 해수의 염분도를 감소시키는 반면 영양염류를 증가시키므로(Johannes, 1980), 이러한 해역에서는 미세조류의 번식이 촉진된다. 따라



**Fig. 7.** Fuzzy membership functions for springs. (a) geological map (SF : Seogwipo Formation, Qta : Trachyandesite, Qtb : Trachybasalt, Qb : Basalt, Qs : Sediments), (b) density of drainage system, (c) density of lineaments, (d) density of cinder cones, (e) groundwater table.

서 하천이나 용천수의 유입이 적은 신양리 부근 해역은 해저용출수 발달 가능성이 예상된다.

**4.4. 용천수 분포와의 상관성**

각 주제도 별 퍼지소속함수(fuzzy membership function)를 그래프에 도시하여 용천수와의 상관성을 검토한 결과 지질도에서는 서귀포층, 조면안산암, 조면현무암(I), 현무암(I), 조면암 등의 퍼지소속함수가 0.6 이상으로 높게 나타났는데(Fig. 7a), 초기에 분출한 용암 지역에서 용천수가 더 많이 산출되었다. 이는 초기에 분출한 용암류를 후기에 분출된 용암류가 피복함으로써, 이들 용암류의 경계가 지하수의 이동통로 역할을 하기 때문인 것으로 판단된다. 수계에서는 분포 밀도 10 이상의 높은 곳에서 퍼지소속함수가 높게 나타났다(Fig. 7b). 수계가 밀집되어 발달하는 남북지역은 경사가 급하여 지하수의 침투와 함께 유속이 빨라져 용천수의 산출에 유리한 조건이 되기 때문인 것으로 사료된다. 분석구들의 분포 및 이들을 연결하는 추정선구조와 용천수의 상관성을 분석한 결과 선구조 및 분석구의 분포 밀도가 각각 4, 2 이하의 아주 낮은 곳에서 퍼지소속함수가 높았다(Fig 7c, 7d). 이는 분석구들이 해안 저지대보다는 중산간 지역에 주로 분포하고 선구조들도 비슷한 분포 특징을 나타내며, 이에 수반되는 지질구조적 균열은 지하수의 침투 통로로서의 역할이 더욱 크기 때문인 것으로 판단된다. 한편 지하수위분

포도에서는 지하수위가 낮아질수록 퍼지소속함수가 높아지는 경향이 있고, 지하수위 0m에서는 퍼지소속함수가 0.7로서 높은 상관성을 나타내었다(Fig. 7e).

퍼지 소속함수들을 결정한 후 최대, 최소, 산술합, 산술곱,  $\gamma(\gamma=0.1, 0.5, 0.9)$  등 5가지 퍼지 연산자를 사용하여 공간 통합을 실시하고, 그 결과를 정량적으로 평가하기 위하여 Chung and Fabbri(1999)가 제안한 성공비율곡선(success rate curve)을 작성하였다(Fig. 8). 그 결과 5가지 연산자 중  $\gamma$  연산자( $\gamma=0.5$ )를 이용한 통합 결과가 가장 높은 성공비율을 나타내었는데, 연구지역의 상위 10%에 대하여 용천수 위치의 약 73%를 설명하는 것으로 나타났다.

$\gamma$  연산자( $\gamma=0.5$ )를 이용한 퍼지통합 결과에서 대체로 해안선을 따라 용천수의 산출비율이 높게 나타났으며, 특히 높은 산출비율(98~100%)을 나타내는 지역은 제주도 동북부와 서북부 지역에 집중적으로 분포하였다(Fig. 9). 이러한 결과는 12월 영상의 해수면온도 분석에서 제주도 동북부와 서북부 지역에 저온 이상대가 나타나는 것과 잘 일치한다. 또한 저투명도 이상대가 동북부와 서북부 지역에 집중 분포하는 것과도 잘 일치한다. 따라서 용천수가 밀집 분포하는 곳의 연안 해저에서는 지하수 용출 가능성이 높은 것으로 판단된다.

**4.5. 현장 확인 조사**

Landsat TM 자료 분석 및 용천수 분포 특징 분석

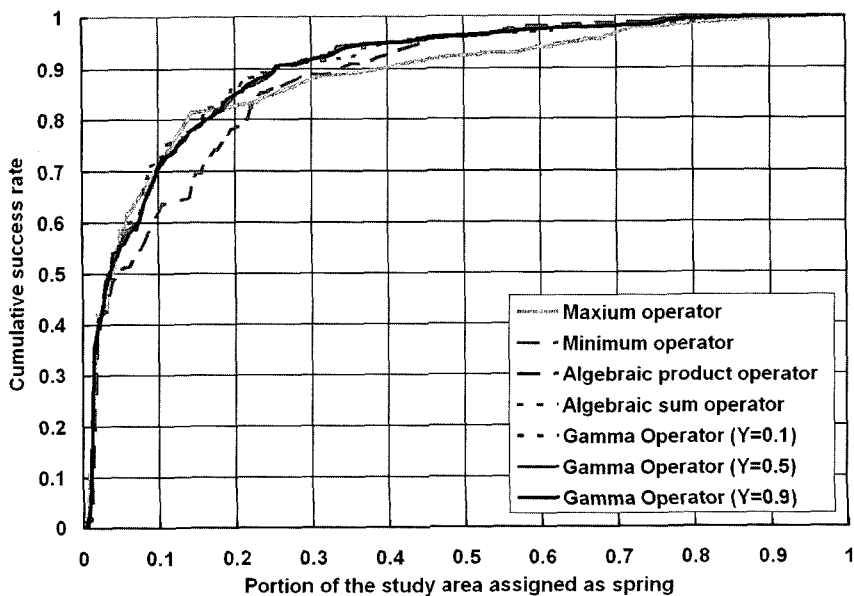


Fig. 8. Success rate curves of submarine groundwater discharge mapping by fuzzy set operators.

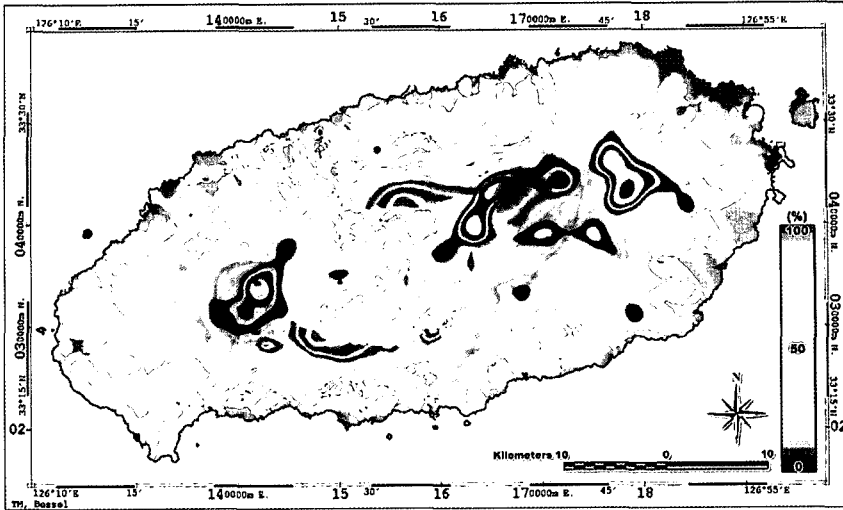


Fig. 9. Fuzzy integration results using gamma operator ( $\gamma=0.5$ ).

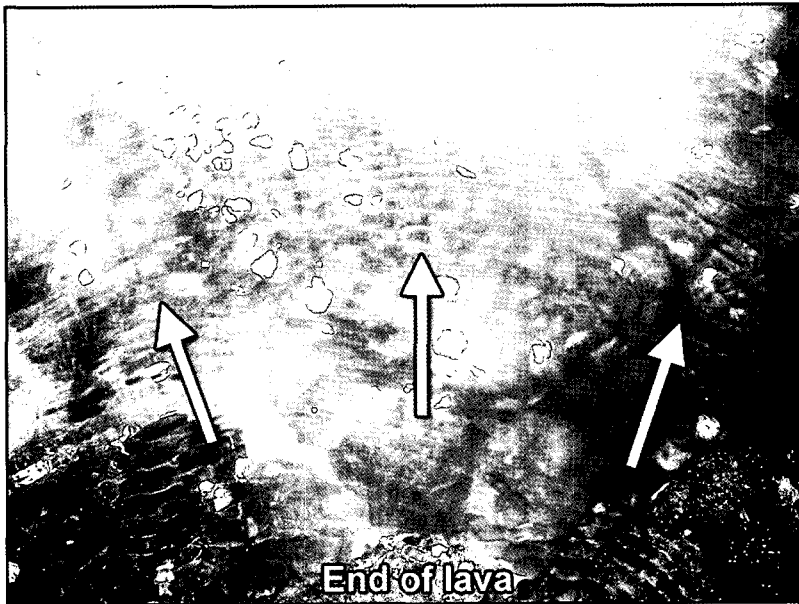


Fig. 10. Photograph of spring water discharge into the ocean at Gimnyeong-ri area (GPS 9).

결과를 확인하기 위하여 현장 확인 조사를 실시하였다. 분석 결과들에서 해저용출수 가능성이 높은 제주도 동북부와 동남부 지역을 방문한 결과 동북부의 김녕 지역(GPS 9)에서는 연안의 용암류와 해수면이 만나는 지점에서 막대한 양의 용천수가 스며나오는 것을 확인할 수 있었다(Fig 10). 특히 동남부의 신산리(GPS 10)에서는 간조 시에도 수심 1~2m의 해저면에서 용출되는 지하수를 확인할 수 있었다(Fig 11). 김녕 지역은 지하를 흐르던 지하수가 밀도 차에 의해 해수와 담수의 경

계인 해안선을 따라 유출되는 경우이며, 이 지역에 분포하는 용암류 경계의 틈을 따라 용출되는 것으로 확인되었다. 신산 지역 역시 용암류의 경계면을 따라 흐르던 지하수가 해저면의 틈으로 용출되는 경우로서, 해수면으로 솟아오르는 것으로 보아 어느 정도 피압된 대수층으로부터 용출되는 것으로 판단된다.

이를 정량적으로 평가하기 위해 현장에서 용천수(담수), 해수, 해저용출수(혼합수)로 구분하여 수온, 염분도, 전기비전도도를 측정하고, 각각에 대하여 21씩 채

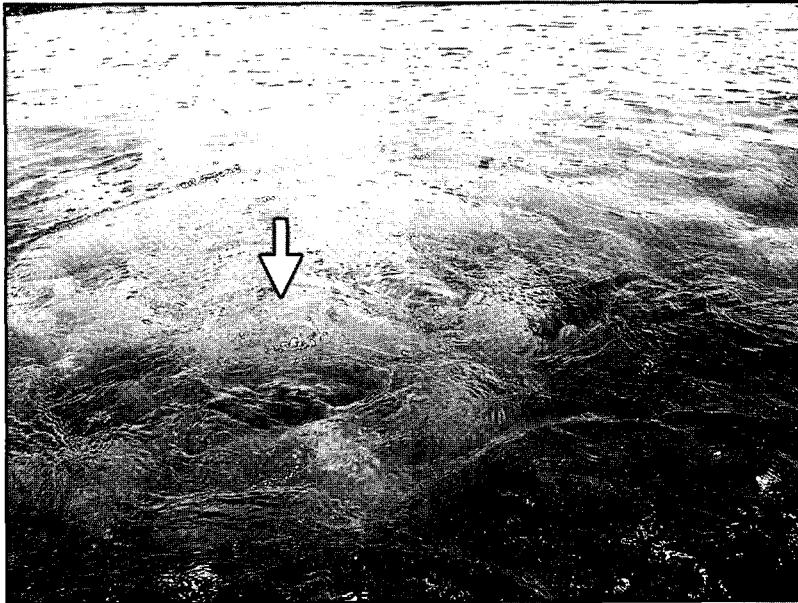


Fig. 11. Photograph for the submarine groundwater discharge at Sinsan-ri area (GPS 10).

Table 2. Measurement results of salinity, temperature, Chlorophyll-a for spring and submarine groundwater in Jeju Island.

Sample No.	gps16	gps17	gps13	gps11	gps9	gps10-1	gps18	gps9-1	gps10
Temperature (°C)	15.8	15.4	15.8	16.1	16	16.2	18.6	18.8	19.4
Salinity (‰)	0.6	2.2	2.5	4.4	8.2	9.6	23.6	26.7	32.5
Chlorophyll-a (µg/m <sup>3</sup> )	1.28	2.336	0	10.24	5.568	9.92	528	118.08	8.064
Plankton Species (spp.)	2	5	1	6	3	1	26	12	3

수하여 실험실에서 미세조류(plankton) 중 다양성 및 클로로필-a 농도를 분석하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다.

해수에 용천수 또는 해저용출수가 유입되는 경우 주변 해수에 비해 수온이 1~2°C 정도 낮아지고, 염분도 10% 정도 낮아지는 것으로 확인되었다. 그리고 실내 분석 결과 미세조류의 종 다양성은 용천수가 해수와 혼합되는 지점(23.6%)에서 26종으로 가장 높았고, 해안선으로부터 내륙 쪽으로 떨어져 있는 용천수(0.6‰)에서 가장 낮았으며, 순수 해수(32.5‰)도 2종으로 매우 낮은 편이었다. 클로로필-a 농도 분석에서도 종다양성과 동일한 양상을 나타내었는데, 용천수가 해수와 혼합되는 지점(23.6%)이 528 µg/m<sup>3</sup>으로 가장 높았고, 용천수(담수)와 해수는 각각 2.3 µg/m<sup>3</sup>, 8.1 µg/m<sup>3</sup>으로 매우 낮게 나타났다. 이러한 결과는 해저용출수가 유입되면 수온과 염분도가 낮아지며, 클로로필-a 농도 변화를 초래한다는 것을 입증하는 것이다.

## 5. 결 론

계절적으로 4월, 8월, 12월에 촬영된 Landsat TM 자료를 이용하여 해수면 온도, 투명도, 클로로필-a 농도 등의 분포 특성을 분석함으로써 제주도 연안의 해저 용출수와 관련된 이상대를 파악하였다.

해수면온도 분석 결과 계절적인 영향으로 제주도 인근 해역의 수온이 변화함으로써 주변해역과 저온이상대와의 수온차가 달라지며, 이로 인해 그 규모 및 경계구분 정도도 차이를 보였다. 8월에 촬영된 영상에서는 제주도 북부 지역에 최대 3°C 정도 차이를 보이는 저온대가 뚜렷이 관찰되며, 12월 영상에서도 같은 지역에 2°C 정도의 뚜렷한 저온대가 다수 관찰된다. 반면에 4월 영상에서는 이 지역에 0.5~1°C 정도로 온도차가 미미하여 해저용출수의 구분이 곤란하였다.

Landsat TM 자료의 밴드비 연산에 의한 투명도 이상대를 추출하여 해저 용출수와 관련된 이상대를 파악

한 결과, 연안지역의 투명도가 대체로 낮았으며, 여름철인 8월 영상에서 범위가 가장 큰 것으로 나타났다. 지역적으로는 제주도 동북부와 서북부의 투명도가 다른 지역에 비해 더 낮게 나타났는데, 일부 지역에서는 용천수 및 양식장 배출수의 영향이 적으면서 뚜렷한 저투명도 영역이 넓게 분포하고 있어 해저용출수의 가능성이 존재한다.

Landsat TM Band 3 자료를 이용한 클로로필-a 이상대 추출한 결과 제주도 동북부 지역에서 클로로필-a 농도가 높게 났는데, 이 해역은 하천, 용천수, 해저용출수 등에 의한 영향이 예상되는 곳으로, 다량의 영양염류 유입에 의한 미세조류의 번식이 촉진되는 것으로 사료된다. 따라서 하천이나 용천수의 유입이 적은 신양리 부근 해역이 해저용출수 발달 가능성이 높은 것으로 판단된다.

퍼지기반 공간통합기법을 적용한 용천수의 분포 특징을 분석한 결과  $\gamma$  연산자( $\gamma=0.5$ )를 이용한 통합 결과가 가장 높은 성공비율을 나타내었고, 제주도 동북부와 서북부에 높은 산출비율(98~100%)을 나타내는 지역이 집중적으로 분포하였다. 이러한 결과는 해수면 온도 및 투명도 이상대의 분포 위치와 일치하였다. 따라서 용천수가 밀집 분포하는 곳의 연안 해저에서는 용출수의 산출 가능성이 높은 것으로 판단되었다.

해저용출수는 비교적 심부의 피압된 지하수가 해저로 유출되는 것으로 이는 지구조적 환경에 직접적인 영향을 받는다. 따라서 제주도에 분포하는 분석구의 배열에 관련된 구조선, 꽃자왈 등에 관련된 지구조적 연구가 병행되어야 할 것으로 사료된다. 또한 해저 용출수 발달은 현장실험에 의한 수온, 수질 등 해양학적 연구가 필수적이며, 특히  $^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ 의 수평·수직적 분포패턴과 이동·확산 등에 대한 연구가 병행되어야 할 것이다.

## 사 사

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000-10060-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 이 논문에 대해 세심한 지적과 조언을 해주신 제주발전연구원 박원배 박사님과 한국지질자원연구원 이사로 박사님께 진심으로 감사드립니다.

## 참고문헌

강태연, 최영찬, 고유봉 (1996) 제주도 주변 용승역의 생

- 물생태학적 기초연구(I). 한국수산학회지, 29권, p. 603-613.
- 국립수산과학원 (1998) 한국근해 30년 평균 수온 염분 용존산소 수평분포도. 국립수산과학원, 268p.
- 김환기, 김태근 (1996) 원격탐사에 의한 대청호 수질 관리 방안. 대한환경공학회지, 18권, p. 1383-1396.
- 농림부, 제주도, 농어촌진흥공사 (1998) 제주도 지하수 개발 보고서. 348p.
- 박관석 (2004) 제주도에서 해저를 통해 유출되는 지하수의 화학적 특성과 유출량 측정. 부경대학교 박사학위 논문, 141p.
- 박노옥, 지광훈, Chung, C.J.F, 권병두 (2003) 퍼지 이론을 이용한 GIS 기반 자료유도형 지질자료 통합의 이론과 응용. 자원환경지질, 36권, p. 243-255.
- 박원배, 박윤석, 고기원, 문덕철 (2003) 제주도 동부지역 지하수의 담·염수경계면 분포와 변화. 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회, p. 55-58.
- 송시대, 윤선 (2002) 제주도 꽃자왈지대의 용암 No. 1. 조천-함덕 꽃자왈지대. 지질학회지, 38권, p. 377-389.
- 원중선, 류주형, 지광훈 (1998) RadarSat SAR 자료를 이용한 제주도 선구조 연구 및 용천 특성 연구. 대한원격탐사학회지, 14권, p. 325-342.
- 윤정수, 변충규 (1992) 제주 연안해역의 부유물질 변화특성. 한국양식학회지, 5권, p. 93-108.
- 이대근, 김형수, 박찬석, 원중호, 김규범 (2002) 거제도 해안유출지하수 예비조사 및 활용방안 연구. 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회, p. 253-256.
- 이문원 (1994) 제주도의 형성사와 지질구조. 대한지하수환경학회, 전략광물자원 연구센터-제주도 지하수자원의 환경학적 보전과 개발 이용, p. 54-74.
- 이봉주, 문상호, 박기화, 고동찬, 고기원 (2002) 제주도 용천수의 수리지화학적 특성. 지질학회지, 38권, p. 421-439.
- 이상규 (1994) 제주도 지하수 문제에서 물리탐사의 역할. 대한지하수환경학회, 전략광물자원 연구센터-제주도 지하수자원의 환경학적 보전과 개발 이용, p. 75-91.
- 이상호 (1994) 제주도 해안지하수의 염수침입 개연성. 대한지하수환경학회, 전략광물자원 연구센터-제주도 지하수자원의 환경학적 보전과 개발 이용-, p. 145-165.
- 정중철, 유신재 (1998) Landsat TM 을 이용한 수온 분포 분석. 대한원격탐사학회 1998년도 춘계 학술대회 논문집, p. 67-71.
- 제주도 (1998) 제주·애월도폭 지질보고서. 290p.
- 제주도 (1999) 제주의 물, 용천수. 392p.
- 제주도 (2000a) 서귀포·하효리도폭 지질보고서. 163p.
- 제주도 (2000b) 제주도 지하수 보전·관리계획 보고서. 588p.
- 제주도 (2002) 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(II). 343p.
- 제주도, 한국수자원공사 (2003) 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(III). 425p.
- 한국자원연구소 (2000) 모슬포·한림도폭 지질보고서. 56p.
- 한국자원연구소 (2000) 제주(백아도, 진남포) 지질도폭 설명서(1:250,000). 59p.
- An, P., Moon, W.M., and Rencz, A. (1991) Application of fuzzy set theory to integrated mineral exploration. Canadian Jour. Exploration Geophysics, v. 27, p. 1-11.
- Burnett, W.C., Taniguchi, M., and Oberdorfer, J. (2001) Measurement and significance of the direct discharge of groundwater into the coastal zone. Journal of Sea Research, v. 46, p. 109-116.
- Catt, M., Saito, K., and Williams, W.P. (1984) Excitation-

- energy distribution in green algae. The existence of two independent light-driven control mechanisms. *Biochimica et Biophysica Acta*, v. 767, p. 39-47.
- Choi, S.W., Moon, W.M., and Choi, S.G. (2000) Fuzzy logic fusion of W-Mo exploration data from Seobyeog-ri, 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, No. (1976) Subjective Bayesian methods for rule-based inference systems. *Proceedings of the 1976 National Computer Conference*, p. 1075-1082.
- Jo, M.H., Suh, Y.S., and Kim, B.S. (1999) A study on Chlorophyll estimating algorithm in Kwangyang bay using satellite image. *Proceedings of International Symposium on Remote Sensing*, p. 249-255.
- Lathrop, R.G., and Lillesand, T.M. (1987) Calibration of thematic mapper thermal data for water surface temperature mapping: Case study on the Great Lakes. *Remote Sensing of Environment*, v. 22, p. 297-307.
- Lee, J.C. (1983) Variations of sea level and sea surface temperature associated with wind-induced upwelling in the southeast coast of Korea in summer. *The Jour. Oceanological Soc. Korea*, v. 18, p. 149-160.
- Moon, W.M. (1998) Integration and fusion of geological exploration data: a theoretical review of fuzzy logic approach. *Geosciences Journal*, v. 2, p. 175-183.
- Slomp, C.P. and Cappellen, P. V. (2004) Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge: controls and potential impact. *Journal of Hydrology*, v. 295, p. 64-86.
- Stumpf, R.P., and Tyler, M.A. (1988) Satellite detection of bloom and pigment distributions in estuaries. *Remote Sensing of Environment*, v. 24, p. 385-404.
- Suh, Y.S., Jang, L.H., and Lee, N.K. (2004) Detection of low salinity water in the Northern East China Sea during summer using ocean color remote sensing. *Korean Jour. Remote Sensing*, v. 20, p. 153-162.

---

2005년 5월 16일 원고접수, 2005년 8월 10일 게재승인.