자원환경지질, 제36권, 제3호, 243-255, 2003
Econ. Environ. Geol., 36(3), 243-255, 2003

퍼지 이론을 이용한 GIS 기반 자료유도형 지질자료 통합의 이론과 응용

박노욱[1]* · 지광훈[1] · Chang-Jo F. Chung[2] · 권병두[3]
[1]한국지질자원연구원 지질자원정보센터, [2]Geological Survey of Canada, [3]서울대학교 지구과학교육과

GIS-based Data-driven Geological Data Integration using Fuzzy Logic: Theory and Application

No-Wook Park[1]*, Kwang-Hoon Chi[1], Chang-Jo F. Chung[2] and Byung-Doo Kwon[3]
[1]Geoscience Information Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
[2]Geological Survey of Canada, [3]Department of Earth Sciences, Seoul National University

The mathematical models for GIS-based spatial data integration have been developed for geological applications such as mineral potential mapping or landslide susceptibility analysis. Among various models, the effectiveness of fuzzy logic based integration of multiple sets of geological data is investigated and discussed. Unlike a traditional target-driven fuzzy integration approach, we propose a data-driven approach that is derived from statistical relationships between the integration target and related spatial geological data. The proposed approach consists of four analytical steps; data representation, fuzzy combination, defuzzification and validation. For data representation, the fuzzy membership functions based on the likelihood ratio functions are proposed. To integrate them, the fuzzy inference network is designed that can combine a variety of different fuzzy operators. Defuzzification is carried out to effectively visualize the relative possibility levels from the integrated results. Finally, a validation approach based on the spatial partitioning of integration targets is proposed to quantitatively compare various fuzzy integration maps and obtain a meaningful interpretation with respect to future events. The effectiveness and some suggestions of the schemes proposed here are illustrated by describing a case study for landslide susceptibility analysis. The case study demonstrates that the proposed schemes can effectively identify areas that are susceptible to landslides and γ operator shows the better prediction power than the results using max and min operators from the validation procedure.

Key word : fuzzy logic, data-driven representation, spatial integration, geological information

유용광물자원탐사나 산사태 취약성 분석과 같은 지질학적 응용을 목적으로 GIS를 이용하여 다양한 지질자료를 통합하기 위한 수학적 모델이 개발되어 왔다. 여러 공간통합 방법 중에서 불확실한 정보를 효율적으로 다룰 수 있는 것으로 알려진 퍼지 이론을 이용한 지질정보의 통합에 대해서 논의하였다. 그동안 전문가의 의견에 의존하여 지질자료를 표현하는 목표 유도형 통합방법과 달리, 통합 목표와 지질자료 사이의 통계적 관계를 이용하는 자료 유도형 통합방법을 제안하였다. 제안된 기법은 퍼지 소속함수로의 표현, 퍼지 연산자를 이용한 결합, 비퍼지화, 검증의 4단계로 구성된다. 자료 표현에는 우도비에 기반한 퍼지 소속함수를, 퍼지 소속함수들의 결합에는 퍼지 연산자 네트워을, 통합결과의 상대적인 가능성값을 도시하기 위해 비퍼지화 단계를 각각 제안하였다. 최종적으로 통합 목표에 대한 의미있는 해석과 다양한 퍼지 연산자 네트워의 정량적 비교를 위해 공간 분할에 기반한 검증 과정을 제안하였다. 지질학적 응용을 목적으로 제안한 방법론의 적용가능성, 실제 적용시의 제안점을 산사태 취약성 분석 적용연구를 통해 논의하였다. 적용연구 결과, 대상지역에서 산사태에 대한 취약한 지역을 구분하는데 제안기법이 효과적으로 이용될 수 있음을 확인할 수 있었으며, 검증을 통해 최종 퍼지 소속함수의 결합에 γ 연산자를 사용한 경우가 최대, 최소 연산자를 사용한 경우에 비해 높은 예측능력을 나타내었다.

주요어 : 퍼지 이론, 자료 유도형 표현, 공간 통합, 지질정보

*Corresponding author: nwpark@kigam.re.kr

1. 서 론

각종 지질자료들은 위치정보와 함께 제시되고 분석되어야 한다는 특징을 가지고 있고, 지질학이 종합적 시각과 자료의 통합적 분석을 요구한다는 점에서 대용량 정보의 수집, 저장, 분석 및 관리 등에 효과적인 GIS의 중요성이 점차 증대되고 있다(Aronoff, 1989; Burrough and Macdowell, 1998). GIS는 기본적으로 컴퓨터를 이용한 기술적 측면이 중요한 요소이지만, 여러 변수가 복합적으로 작용하여 공간적으로 나타나는 지질 현상의 특성을 고려하면 GIS의 적용범위는 현재 제한적으로 적용되고 있는 지질학의 활용분야를 확대할 수 있는 가능성이 있다. 특히 GIS의 여러 지질학적 응용방안 중에서 레이어 개념을 도입한 공간자료 통합은 중요한 과제로 인식되고 있으며, 이러한 동향은 자연과학과 GIS를 연계시키려는 주요 동향 중 하나로 간주될 수 있다(Bonham-Carter, 1994).

현재까지 격자형 자료처리를 위해 개발된 대부분의 GIS 툴에서 제공하는 자료통합모듈은 부울집합론에 근거한 이진수 화상처리기법에 근간을 두고 있다. 따라서 이러한 연산을 지질자료에 곧바로 적용할 경우에는 통합 결과로 제시되는 결정보조정보의 배경이 충분치 못하거나, 또한 경우에 따라서는 심각한 해석상의 오류를 야기하여 예측될 수 있는 결과와 큰 차이를 보일 수 있다(박노욱, 1999).

이러한 배경에서 다양한 공간 지질자료를 효율적으로 다루기 위한 수학논리적 자료 통합론의 개발과 응용 연구가 국내외적으로 진행되어 왔다. 개발된 통합 방법론으로는 베이지안 조건부 확률 모델, Weight of Evidence, 로지스틱 회귀분석 등의 확률론적 방법(Bonham-Carter *et al.*, 1988; Chung and Fabbri, 1999), Dempster-Shafer 이론(Moon, 1990), 퍼지 이론(An *et al.*, 1991; Choi *et al.*, 2000; Carranza and Hale, 2001) 등 다양하다. 이러한 방법론의 실제 적용에서는 자료통합의 목적이 대부분 유용광물 탐사, 산사태 예측 등의 분야에 집중되어 있으나, 지구물리 탐사 자료의 통합(Kwon and Oh, 2002), 입지 선정 등의 여러 분야에도 응용이 가능하다.

이 연구에서는 공간통합 방법론 중 퍼지 이론에 기반한 지질자료 통합 방법론에 대해서 논의하고자 한다. 확률론적 공간통합 방법의 경우, 대부분 응용목적에 대한 공간상의 사전정보(a prior information)를 필요로 하거나, 특별한 가정(조건부 독립, 선형관계 등)을 필요로 한다. 이에 비해 퍼지 이론은 명확하지 않은 공간자료의 특성을 살리고 기존 확률론에서의 엄격한 경계설정으로 인하여 발생하는 공간 자료의 손실을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다(Zadeh, 1978; Zimmerman, 1984; Moon, 1998). 유용광물 탐사에 적용되어온 퍼지 이론의 경우 탐사 목적에 대한 공간상의 정보가 거의 없거나 불확실한 경우가 대부분이기 때문에 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 표현한다. 기존 공학적인 응용을 목적으로 개발된 퍼지 이론은 대부분 연속형 자료에 기반하고 있기 때문에 지질도와 같은 범주형 자료를 포함하는 지질자료의 통합에는 직접적인 이용이 어렵다.

이에 이 논문은 자료 유도형 퍼지 공간통합론을 제안하였는데, 크게 두부분으로 구성되어 있다. 첫 번째 부분에서는 유용광물 탐사, 산사태 예측과 같은 지질학적 목적에 직접적으로 응용이 가능한 자료 유도형 퍼지 이론을 제안하였고, 두 번째 부분에서는 제안 이론의 적용 가능성 및 실제 적용에 대한 제안점을 논의하기 위해 산사태 취약성 분석을 목적으로 한 적용 연구를 수행하였다.

2. 자료유도형 퍼지 공간통합론

2.1. 퍼지 이론

일반적으로 공간적인 위치자료와 속성자료를 나타내는 공간자료는 위치에 대한 불확실성과 매개변수나 기준치에 관련된 의사결정규칙의 불확실성을 가지고 있기 때문에 공간분석시 엄격한 경계의 설정이 어렵다. 반면 Zadeh(1965)에 의해 소개된 퍼지 이론은 집합의 경계값 설정에 있어서 유연성을 가지며, 집합에의 포함을 정도(degree)로 나타냄으로써 부분적인 소속이 가능하다. 따라서 불확실성을 가진 공간자료의 분석에 퍼지 이론은 효과적으로 적용될 수 있으며 정보의 손실을 최소화 할 수 있는 장점이 있다(Banai, 1993). 이 논문은 퍼지 이론의 소개가 주목적이라기보다는, 공간통합론의 관점에서 지질자료의 통합을 위한 퍼지 이론의 실제 적용이 목적이기 때문에 여기서 퍼지 이론에 대한 자세한 설명은 피하며 이에 대해서는 Zadeh (1978)와 Zimmerman(1984)을 참조할 수 있다.

일반적인 공간 통합은 자료 표현(data representa-

tion)과 자료 통합(integration/fusion)의 2단계로 이루어진다(Moon, 1998). 기존 퍼지 이론을 이용한 공간 통합에서는 퍼지 소속함수로 표현되는 가능성값을 직접적으로 해석에 사용하였다. 그러나 자료 통합에 사용한 연산자의 특성에 따라 가능성값의 비교나, 다른 이론적 배경을 가지는 공간통합의 결과와 직접적인 비교가 힘든 경우가 있을 수 있다. 또한 산사태 취약성 분석과 유용광물자원 탐사와 같은 예측과 관련된 공간통합에서 중요한 것은 통합 결과의 상대적인 유의미성과 미래에 대한 예측 능력의 비교인데, 기존 연구에서는 이러한 과정이 생략되어 있었다.

이에 이 논문에서는 기존 공간 통합 연구에서 수행하지 않은 앞에서 설명한 과정을 추가하여 공간통합을 퍼지 소속함수를 이용한 자료 표현(fuzzy membership function representation), 퍼지 연산자 네트워을 이용한 자료 통합(fuzzy combination), 비퍼지화(defuzzification), 검증(validation) 등의 4단계로 구성된 퍼지 공간통합론을 제안하고 논의하였다(Fig. 1). 각 단계별 자세한 설명은 다음 절부터 제시하였다.

2.2. 우도비를 이용한 퍼지 소속함수 표현

퍼지 이론에서는 퍼지 소속함수(fuzzy membership function)를 이용하여 자료를 표현한다. 격자 형태의 지질자료가 n개 있을 때, GIS의 기본적인 전처리 과정(내삽, 재배열, 좌표투영)을 거친 연구 지역내의 각각의 자료는 E_k ($k=1, \cdots, n$)로 나타낼 수 있다. 통합 목적을 T_p로 정의하면, 통합 목적에는 연구지역내에 부존하는 특정 유용광물의 발견, 산사태에 대해 취약한 위치를 찾아내는 것들이 해당된다. 지질자료 E_k를 통합 목적에 맞도록 표현하기 위해서, E_k를 구성하는 각각의 속성값 또는 실제 관측값은 다음과 같은 수학적 mapping을 통해 표현된다.

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

부울집합론에서는 이 mapping을 통하여 이진수의 의미로 존재의 유무만을 지시하나, 지질자료를 다루는 경우에는 통합목적을 위하여 지질자료를 mapping하는 과정에서 0과 1사이의 값들이 실제로 중요한 의미를 갖게된다. 따라서 퍼지 이론은 이러한 사항을 효과적으로 처리할 수 있는 중요한 방법으로 간주될 수 있다.

자료 표현시 가장 중요한 사항은 자료 자체를 통합 목적에 대해 어떻게 현실적으로 관련시킬 수 있느냐 하는 점이다. 서론에서 언급한 것처럼 통합 목적에 대한 공간 정보(기존 광상 위치, 산사태 위치 등)가 거의 없거나 불확실한 경우에 적용할 수 있는 목표 유도형 통합의 경우 전문가의 지식에 의존하여 자료 표현을 수행하게 되는데, 이 경우 연구 대상지역의 특성과 전문가에 따라 자료 표현의 방식과 결과가 달라지며 기준 설정이 애매하기 때문에 일반화하기 힘든 경우가 많다. 반면 자료 유도형 통합의 경우 공간자료로부터 통합 목적의 대상에 대한 특성이 표현될 수 있다는 가정하에 자료를 표현하기 때문에 일반화할 수 있는 장점이 있다.

이 논문에서는 자료유도형 통합 방법으로 지질자료를 퍼지 소속함수로 표현하기 위하여 통합목적과 지질자료와의 통계적 특성에 기반한 방법을 제안하였다. 제안된

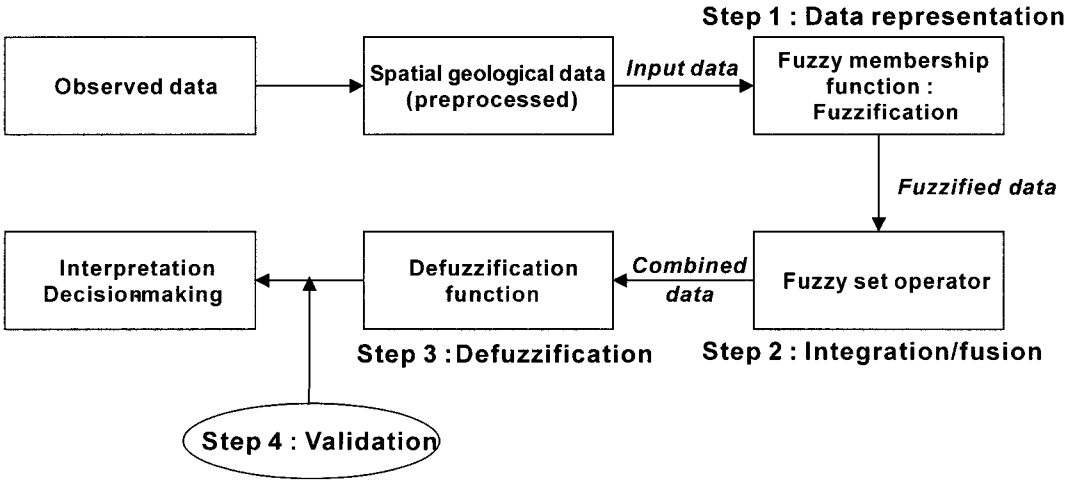

Fig. 1. Flowchart for fuzzy logic based spatial data integration procedure proposed in this study.

방법은 2단계의 자료 표현 과정을 거치게 되는데, 첫 번째 단계에서 통합목적과 지질자료와의 통계적 상관 관계 추출을 위해 우도비(likelihood ratio)를 계산하고, 두 번째 단계에서 우도비를 퍼지 소속함수로 변형하였다. 일반적으로 퍼지 소속함수는 여러 가지 형태의 기존에 알려진 연속, 불연속 함수를 이용하여 표현될 수 있다. 공학분야에서 퍼지 소속함수로 Delta 함수, Step 함수, Ramp 함수, S 함수 등과 같은 단순한 함수가 이용될 수 있으나, 보통 대칭 혹은 비대칭형의 벨 형 함수가 이용되고 있다(Burrough and Macdowell, 1998). 그러나 지질도, 토양도, 임상도 등과 같은 범주형 자료의 경우 특정 형태의 연속형 함수로의 표현이 불가능하기 때문에 공학분야에서 많이 사용되는 소속 함수를 지질자료에의 직접적인 적용이 힘든 경우가 많다. 기존 통계적 특성에 기반한 자료 표현 방법은 대상 사건이 특정 속성에서 발생하는 상황만을 고려하여, 다른 속성에서 대상 사건이 발생하지 않은 상황에 대한 고려를 못하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 특정 속성에서 발생하는 빈도수에 의존하는 기존 방법에 비해 다른 속성에 대한 고려를 하기 때문에 다른 속성과의 상대적인 의미를 내포하는 장점이 있는 우도비를 사용하였다.

우도비의 이론적 배경과 계산 과정을 산사태 취약성 분석을 목적으로 한 공간통합을 예로 들어 설명하면 다음과 같다. 이 경우 통합 목적은 산사태에 대해 취약한 지역과 취약하지 않은 지역을 구분하고자 하는 것이다. 산사태의 특성이 각종 지형공간자료로부터 표현될 수 있다면, 산사태에 취약한 지역에서의 공간자료의 특성은 산사태에 취약하지 않은 지역에서의 공간자료의 특성과 대비되는 양상을 보이게 된다. 이는 산사태에 발생 지역과 미발생 지역에서의 빈도수 분포 혹은 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).

$$\lambda = P\{E_{Ck}|T_p\}P\{E_{Ck}|\overline{T}_p\} \quad (2)$$

여기서 T_p와 $\overline{T}_p$는 각각 "특정 화소 p는 산사태에 의해 취약하다" 와 "특정 화소 p는 산사태에 대해 취약하지 않다"는 통합 목표를 각각 나타낸다. 유용광물 탐사가 통합 목적일 경우, T_p와 $\overline{T}_p$는 각각 "특정 화소 p에 특정 유용광상이 존재한다" 와 "특정 화소 p에 특정 유용광상이 존재하지 않는다" 는 로 각각 대체될 수 있다.

기존 공간통합의 경우 대부분 지화학, 지구물리탐사, 사면경사 등과 같은 연속형 자료를 클러스터링 과정을 통해 범주형 자료로 변형하여 사용하였다. 그러나 연속형 자료를 범주형 자료로 바꾸는 과정에서 정보의 손실이 있을 수 있기 때문에 본 연구에서는 연속형 자료와 범주형 자료의 우도비 표현을 구분하여 사용하였다.

우선 범주형 자료의 우도비는 빈도수 분포로부터 계산하였다. m개의 속성을 가지는 특정 범주형 자료 E_{Nk}에서 기존 산사태 발생자료의 확률 분포 $P\{E_{Nk}|T_p\}$, 미발생자료의 확률분포 $P\{E_{Nk}|\overline{T}_p\}$, 우도비 $\lambda\{E_{Nk}\}$를 다음과 같이 각각 정의하였다.

$$\begin{aligned} P\{E_{Nk}|\overline{T}_p\} &= [\text{size of } F \cap \text{Area}(E_{Nk})] \\ &\quad /[\text{size of A} - \text{size of F}] \\ P\{E_{Nk}|\overline{T}_p\} &= [\text{Area}(E_{Nk}) - \text{size of } F \cap \text{Area}(E_{Nk})] \\ &\quad /[\text{size of A} - \text{size of F}] \\ \lambda\{E_{Nk}\} &= \{E_{Nk}|T_p\}/\{E_{Nk}|\overline{T}_p\} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, F는 기존 산사태 발생 지역, A는 연구 지역 전체를 나타낸다. 유용광물탐사가 통합 목적일 경우 위의 식에서 F는 기존에 발견된 광상 지역으로 대체된다.

연속형 자료의 우도비 표현은 범주형 자료의 표현처럼 빈도수 분포를 사용하지 않고, 연속형 자료값으로부터 직접적으로 확률 분포를 계산하기 위하여 비모수적 확률밀도 계산에 유용한 평활화 커널 방법을 이용하였다. 일반적으로 사면 경사, 사면 방위 등과 같은 지형정보나 지화학, 지구물리 탐사 자료는 정규 분포를 이루지 않는 경우가 대부분이기 때문에 모수적 방법의 직접적인 적용이 힘든 경우가 많다. 이에 비해 비모수적 방법은 모수를 구하거나 특정 확률 분포를 가정하지 않고 자료로부터 직접적으로 확률밀도를 계산한다. 이 중 평활화 커널 방법은 샘플 자료에 커널 함수를 위치시킨 후 커널 함수의 중첩으로 경험적 확률 밀도 분포를 계산하는 방법에 해당된다(Parzen, 1962; Silverman, 1986).

기존 산사태 발생 위치를 X_i, 산사태가 발생하지 않은 위치를 $\overline{X}_i$, 특정 연속형 자료를 E_{Ck}이라고 할 때 커널 함수 $k(\cdot)$를 이용하여 계산되는 확률 밀도 분포 $P\{E_{Ck}|T_p\}$와 $P\{E_{Ck}|\overline{T}_p\}$ 및 우도비 $\lambda\{E_{Ck}\}$는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P\{E_{Ck}|\overline{T}_p\} &= \frac{1}{\text{size of F}}\sum_{i=1}^{F} k(E_{Ck}(X) - X_i) \\ P\{E_{Ck}|\overline{T}_p\} &= \frac{1}{\text{size of A} - \text{size of F}}\sum_{i}^{A-F} k(E_{Ck}(X) - \overline{X}_i) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\lambda(E_{Ck})=P\{E_{Ck}|T_p\}/P\{E_{Ck}|\overline{T}_p\}$$

범주형 자료의 표현과 마찬가지로 유용광물탐사가 통합 목적일 경우 위의 식에서 F는 기존에 발견된 광상 지역으로 대체된다.

우도비는 [0, ∞]의 값을 가지게 되는데, 우도비가 1보다 클수록 그 속성에서 특정 사건의 발생 가능성이 높음을 의미하며, 1보다 작을수록 발생 가능성이 낮은 것을 의미한다. 퍼지 소속함수는 [0, 1]의 값을 가져야 하기 때문에 우도비를 퍼지 소속함수로의 변환과정이 필요하다. 이를 위해 로지스틱 타입의 변형식을 이용하여 우도비를 최종적으로 퍼지 소속함수로 변환하였다.

$$\mu_k=\lambda_k/(1+\lambda_k) \quad (5)$$

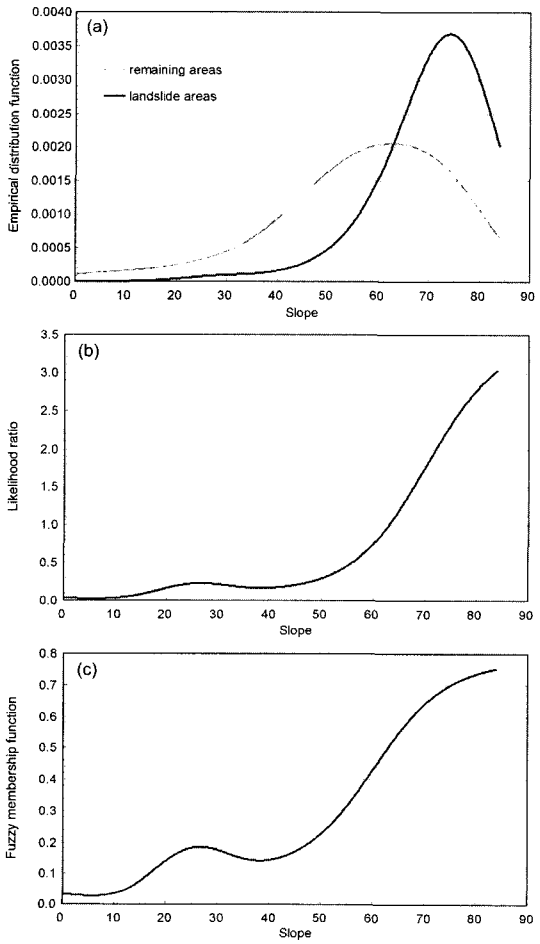

Fig. 2. Fuzzy membership function repreastation; (a) two frequency distribution functions, (b) likelihood ratio function, (c) fuzzy membership function.

여기서 μ_k와 λ_k는 E_k의 퍼지 소속함수와 우도비를 각각 나타낸다.

Fig. 2는 모의 자료로 연속형 자료인 사면 경사를 대상으로 퍼지 소속함수 표현 과정을 예시한 것이다. 산사태 발생 지역과 미발생 지역의 확률분포의 차이는 우도비를 통해 부각되고, 퍼지 소속함수로의 변형을 통해 이러한 양상이 반영되게 된다.

2.3. 퍼지 연산자 네트워을 이용한 통합

개별 지질자료 E_k에 대해서 통합목표에 대한 퍼지 소속함수가 결정이 되면, 이들을 하나의 퍼지 소속함수로 통합하기 위해 퍼지 연산자를 이용하게 된다. 퍼지 소속함수를 통합하기 위한 여러 퍼지 연산자 중에서 지질자료의 통합에 실제 적용가능한 연산자로는 최대(max), 최소(min), 산술합(algebraic sum), 산술곱(algebraic product), γ연산자 등이 있다(An *et al.*, 1991; Moon, 1998; Choi *et al.*, 2000).

각 연산자의 실제 계산과정은 Table 1에 제시하였다. 최대 연산자 μ_{Max}와 최소 연산자 μ_{Max}는 각각 논리적으로 OR과 AND의 의미를 갖으며, 최대값과 최소값을 각각 통합된 결과값으로 넘겨주기 때문에 결과적으로는 각각 최대값과 최소값을 가지는 하나의 E_k의 소속함수값만이 영향을 미치게 된다. 최대 연산자와 최소 연산자가 하나의 퍼지 소속함수에 의해서 통합 결과가 영향을 받는다면, 산술합, 산술곱, γ 연산자들은 주어진 자료의 모든 값들이 영향을 주게 된다. 산술합 연산자는 최대값과 같거나 큰 결과값을 통합된 결과로 넘겨주며, 반대로 산술곱 연산자는 최소값과 같거나 작은 결과값을 통합된 결과로 넘겨주게 된다. 반

Table 1. Fuzzy combination operators.

Operator	Equation
Max	$\mu_{Max}=Max\{\mu_{E1}, \mu_{E2}, ..., \mu_{En}\}$
Min	$\mu_{Min}=Min\{\mu_{E1}, \mu_{E2}, ..., \mu_{En}\}$
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	$\mu_\gamma=\left(1-\prod_{k=1}^{n}(1-\mu_{E_k})\right)^\gamma\times\prod_{k=1}^{n}(\mu_{E_k})^{1-\gamma}(0\le\gamma\le1)$

면 γ 연산자는 0에서 1사이의 값을 가지는 γ값에 따라 산술합과 산술곱의 결과를 절충하는 결과를 보여준다. 만약 하나의 자료가 높은 소속함수값을 가지고, 다른 자료는 낮은 소속함수값을 가질 때 보상효과가 나타나서 가장 높은 값과 낮은 값 사이의 값을 보여준다. γ값이 1일 경우에는 산술합 연산자로, γ값이 0일 경우에는 산술곱 연산자로 각각 호환된다.

앞에서 설명한 퍼지 연산자들을 이용하여 여러 연산을 수행할 수 있기 때문에 다양한 경우에 적용이 가능한 유연성을 가지는 장점이 있으나, 어떤 퍼지 연산자를 적용하는가에 따라 통합 결과가 달라지기 때문에 적용과 해석에 유의해야 한다. 퍼지 연산자의 또다른 장점은 다양한 퍼지 연산자를 통합하고자 하는 자료의 성격에 따라 병렬/직렬로 다양한 연산자의 결합을 통한 퍼지 연산자 네트웍(fuzzy inference network)의 구성이 가능하다는 것이다. 보통 지질자료의 경우 통합 목적에 대해 개별 자료가 나타내는 정보의 양과 질이 다르기 때문에 모든 자료를 하나의 연산자로 통합하기보다는 자료의 성격에 따라 다른 퍼지 연산자를 사용할 필요가 있다. 퍼지 연산자 네트웍의 구성은 보통 확률론적 공간통합의 적용시 가정하고 있는 조건부 독립 가정 문제를 해결할 수 있는 장점이 있다. 공간적으로 유사한 분포를 가지는 비슷한 속성의 지질 자료를 함께 통합에 사용할 경우 자료의 중복으로 인한 과추정(over-estimation)을 야기할 수 있다. 이러한 경우 자료의 성격에 따라 자료의 사용을 제한할 수 있는 퍼지 최대 혹은 최소 연산자를 사용하여 중간단계에서 퍼지 소속함수를 결합한 다음 다른 퍼지 소속함수들과 통합을 할 수 있다.

2.4. 비퍼지화

퍼지 연산자를 이용하여 결합된 최종 퍼지 소속함수는 통합 목적에 대한 목표 명제(T_p)에 대한 가능성을 [0, 1]의 범위에서 나타낸다. 최종 결과의 해석에서 중요한 것은 상대적인 값의 차이이며, 만약 특정 위치에서의 최종 퍼지 소속함수 값이 다른 위치보다 크다면 이는 통합목적에 대한 가능성이 높음을 의미한다. 여기서 유의할 점은 다양한 연산자의 결과를 비교하고 할 때, 최종 통합 결과값의 절대적인 비교는 의미가 없을 수 있다는 것이다. 예를 들어 산술합 연산자와 산술곱 연산자를 이용한 결과를 비교하고자 할 때, 산술합 연산자를 이용한 결과값이 1보다 작은 값들의 곱들로 표현되는 산술곱 연산자 결과값보다 보통 크기 때문에 산술합 결과가 통합목적에 대한 가능성이 높다고 말할 수는 없다. 따라서 상대적인 값의 비교를 위해 퍼지 소속함수 값을 다른 함수값으로의 변환이 필요하며, 이러한 과정을 비퍼지화라고 하였다.

본 논문에서는 비퍼지화를 위해 통합목적에 대한 상대적 가능성을 표현하기 위해 순위(rank)를 이용한 등면적 표현을 이용하였다. 우선 모든 화소를 퍼지 소속함수를 내림차순으로 분류하여 순위를 결정하였다. 이 경우 가장 작은 퍼지 소속함수 값을 나타내는 화소와 최대 퍼지 소속함수 값을 나타내는 화소는 각각 첫 번째 순위와 최대 순위를 가지게 된다. 순위값을 연구지역의 전체 화소수로 나누어줌으로써 0과 1 사이의 값을 가지도록 정규화를 수행한다. 만약 0.9의 값을 가지는 화소는 연구지역에서 상위 10%(90%-100%)에 위치함을 의미한다. 이러한 비퍼지화 과정을 거친 퍼지 통합결과에서 개개 클래스는 같은 수의 화소수를 가지게 된다. 따라서 퍼지 통합 결과에서 가장 높은 순위값을 가지는 클래스는 상대적으로 연구지역에서 가장 높은 퍼지 소속함수값을 나타내면서 동시에 같은 면적을 포함하기 때문에, 개별 클래스 사이의 상대적 비교가 가능한 동시에, 똑같은 비퍼지화 과정을 거친 다른 연산자를 사용한 통합결과와의 상대적 비교도 가능하다.

2.5. 검증

특정 목적으로 어떠한 통합 방법론을 사용하더라도 최종 해석을 위해서는 적용된 통합 방법론의 타당성과 의사결정을 위한 의미 있는 해석을 할 수 있는 보조자료가 필요하다. 현재까지 대부분의 지질학적 응용을 위한 공간 통합 연구는 공간통합 방법의 개발 및 적용에 주안점을 두어 진행되었으며, 검증 과정은 특정 통합 방법을 적용하는데 이용한 통합목적의 대상인 광상의 위치, 과거 산사태 발생 위치 등을 비교하여 왔다. 이러한 과정은 사용된 통합 방법론의 적합성을 평가하는 과정이라고 볼 수 있으나, 최종 목표는 아직 발견되지 않은 미래의 사건에 대한 유의미한 정보를 얻고자 하는 일종의 예측이기 때문에 엄밀한 의미에서의 검증은 통합 방법을 적용하는데 사용하지 않은 통합목적의 대상과의 비교를 수행해야 한다(Chung and Fabbri, 2003). 예측을 위한 지질학적 응용에서 발견되지 않은 광상의 위치, 아직 발생하지 않은 미래의 산사태에 대한 정보를 아직 얻을 수 없기 때문에 직접적인 비교는 불가능하다. 따라서 검증을 모사할 수 있는 방법은 현재 알고 있는 광상의 위치나 과거 산사태 발생 위치의 사용을 제한하는 것이다. 산사태 취약성 분석을 예를

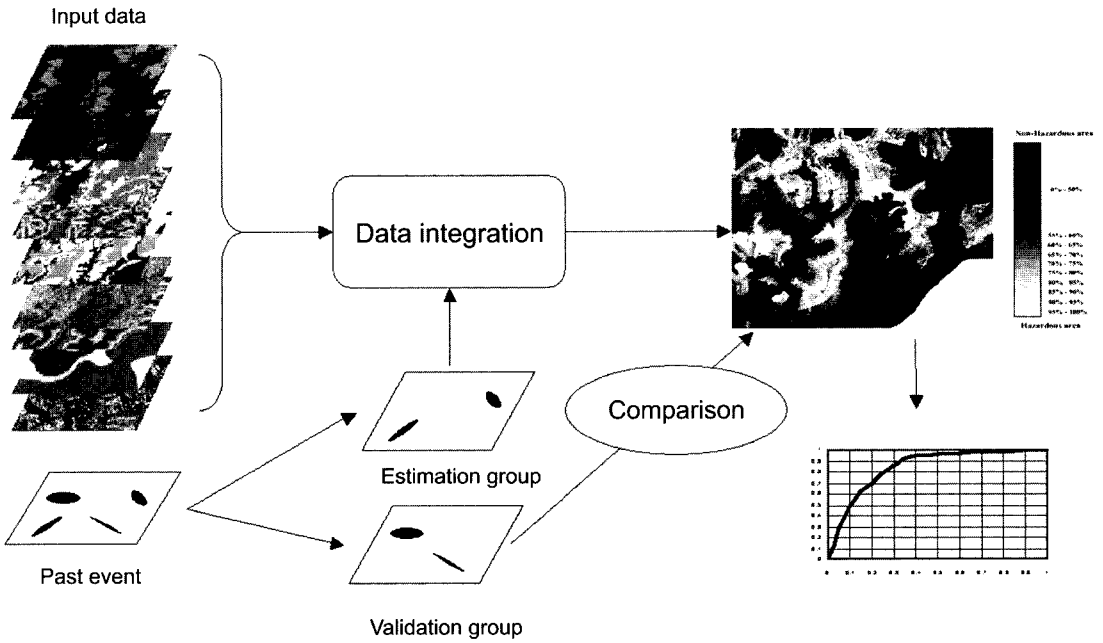

Fig. 3. Schematic diagram for a cross validation procedure.

들면, 과거 산사태 발생위치의 일부를 통합에 사용하고 일부를 아직 발생하지 않은 미래의 산사태로 가정하고 검증에 사용하는 것이다(Fig. 3). 이러한 검증 과정을 통해 미래의 산사태 발생에 대한 예측 가능성에 대한 정보를 부가적으로 얻을 수 있다. 동일한 입력 지질 자료와 동일한 통합 방법을 사용하기 때문에 이러한 검증 결과를 과거 산사태 발생위치를 전부 사용하여 얻어진 통합결과의 해석에 사용할 수 있다. 그동안 지질학적 응용에서 간과되어온 미래의 발생에 대한 정량적인 부가적 정보는 이러한 교차 검증을 통해 얻을 수 있으며, 만약 이러한 검증 과정을 거치지 않을 경우 통합 결과를 미래의 발생과 연관지어서 해석하는 데 어려움이 있다.

3. 적용 연구

본 연구에서 제안한 퍼지 이론을 이용한 자료 유도형 공간통합의 실제 적용을 위해 산사태 취약성 분석을 목적으로 적용 연구를 수행하였다. 적용 연구는 특정 지역의 산사태 취약성 분석이 주목적이라기보다는, 제안한 이론의 실제 적용과정에서의 단계별 예시와 적용 가능성을 예시를 목적으로 수행되었다.

3.1. 연구 지역과 사용 자료

적용연구 대상지역은 1998년 8월 여름에 집중호우로

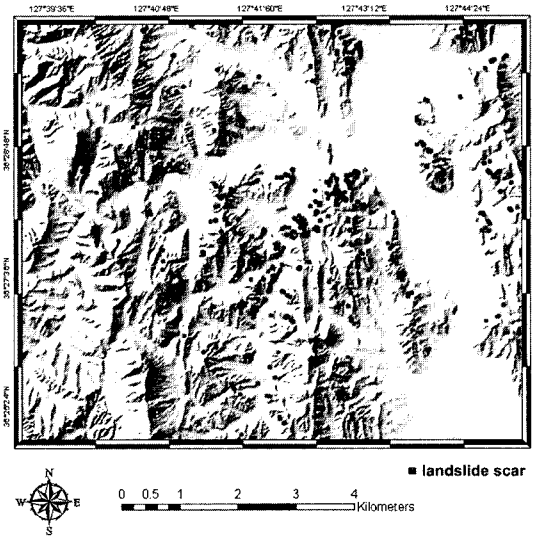

Fig. 4. Landslide scar distribution draped over a shaded relief map in the study area.

많은 산사태 피해를 입은 충청북도 보은 지역이다. 산사태 발생위치는 산사태 발생 전후의 항공사진 분석을 통해 일차적으로 획득하였고, 최종적으로 현장 조사를 통해 flow type의 459개 산사태를 확인하였다(Fig. 4). 산사태 발생과 관련이 있는 공간자료로 (1) 사면 경사도, (2) 사면 방위도, (3) 임상 종류도, (4) 임상 경급

도, (5) 임상 영급도, (6) 임상 밀도도, (7) 토질도, (8) 토양 배수도, (9) 토양 모재도, (10) 유효토심도, (11) 토양 지형도, (12) 지질도를 사용하였으며, 공간자료의 공간 해상도는 5 m이며 총 1720×1444 화소의 GIS 데이터베이스로 구축하였다.

3.2. 공간 통합 결과

본 사례연구에서 사용한 통합 목표 T_p는 "특정 화소

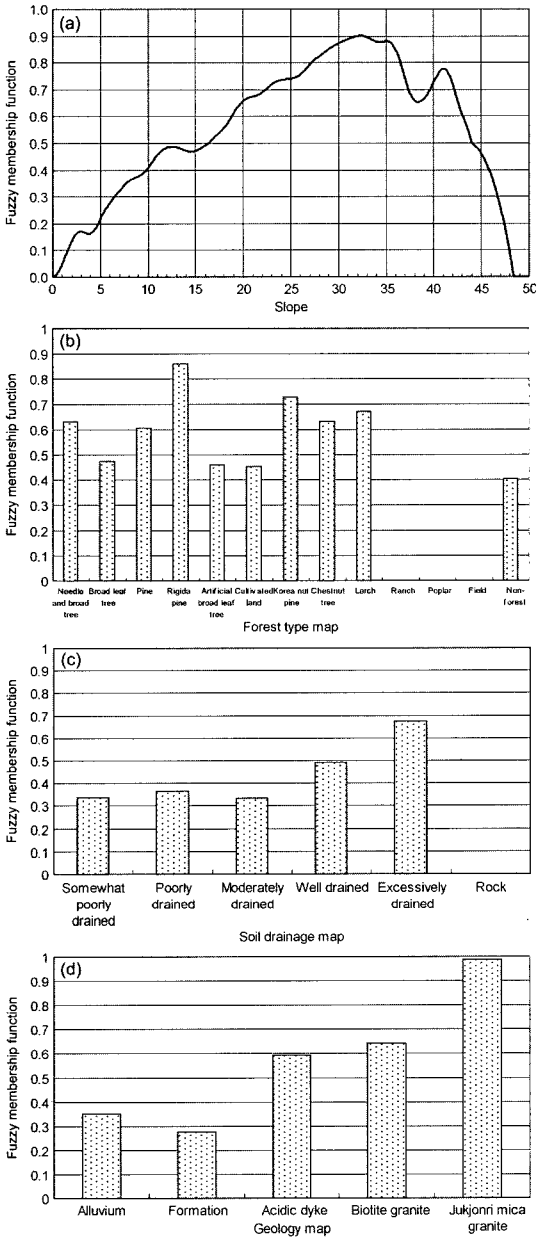

Fig. 5. Fuzzy membership functions of (a) slope map, (b) wood type map, (c) soil drainage map, (d) geology map.

p는 미래의 flow type의 산사태에 의해 취약하다"이며, 공간통합을 위한 퍼지 이론을 적용하기 위해 다음 2가지 가정을 하였다.

첫째, 미래에 발생할 flow type의 산사태의 특징은 연구대상지역에서 발생한 과거 flow type의 산사태와 동일하다.

둘째, 통합에 사용하는 공간 자료는 과거나 미래의 flow type의 산사태가 발생할 특성을 충분히 반영한다.

과거에 발생한 산사태와 공간자료와의 통계적 특성 추출을 위해 범주형 자료와 연속형 자료에 대해서 우도비를 계산한 다음, 퍼지 소속함수로의 변환을 수행하였다. 연속형 자료인 사면 경사도와 사면 방위도의 확률 밀도 함수 결정에 가우시안 형태의 커널을 사용하였다. Fig. 5는 사용한 공간자료 중에서 사면 경사도, 임상 종류도, 토양 배수도와 지질도의 퍼지 소속함수들을 나타낸 것이다. 산사태 취약성 분석에 중요한 자료로 간주되는 사면 경사도의 경우 Fig. 5a, 25도 이상에서 우도비가 1보다 커지는 양상을 보였는데, 이는 사면 경사가 25도 이상인 곳에서 산사태가 주로 발생하였음을 의미한다. 임상 종류도의 경우 Fig. 5b, 리기다 소나무와 잣나무에서 퍼지 소속함수값이 높게 나타났다. 이러한 결과는 일반적으로 침엽수림에서 더 많은 산사태가 발생한다고 보고된 결과(최경, 1986)와도 대체로 일치하는 결과이다. 토양 배수도의 경우 Fig. 5c, 배수가 매우 양호한 경우에서 산사태 발생 가능성이 높은 것으로 나타났다. 일반적으로 집중 호우시 배수가 잘 될수록 물의 흐름을 조절하여 토양이 물을 많이 포함하여 결국 이로 인해 산사태 발생 빈도가 높아지게 된다(이사로와 민경덕, 2000). 지질도의 경우 Fig. 5d 죽전 화강암에서 산사태 발생 가능성이 높게 나타났다.

퍼지 소속함수들을 결정한 다음, 이들의 결합을 위해 자료의 특성을 고려하여 퍼지 연산자 네트웍을 구성하였다(Fig. 6). 그림으로 제시하지는 않았지만, 4개의 자료(임상, 영급, 경급, 밀도)를 포함하는 임상 자료와 5개의 자료(토질, 토양 배수, 토양 모재, 토양 지형, 유효토심)를 포함하는 토양 자료는 각각 공간적으로 유사한 양상을 보인다. 이러한 자료를 모두 통합에 사용할 경우, 유사한 공간적 분포 특성이 과장되어 나타날 위험이 있다. 임상과 토양의 개별자료의 관계가 산사태 취약성에 대해서 모두 만족해야 한다기보다는 1차적, 2차적 정보를 제공한다고 간주하고 이들의 결합에는 퍼지 최대 연산자를 이용하였다. 그리고 전체 자료 통합에는 최대 연산자, 최소 연산자, γ연산자를 각각 사용하여 통합 결과의 양상을 비교하였다. γ연산자의 경우 0.1,

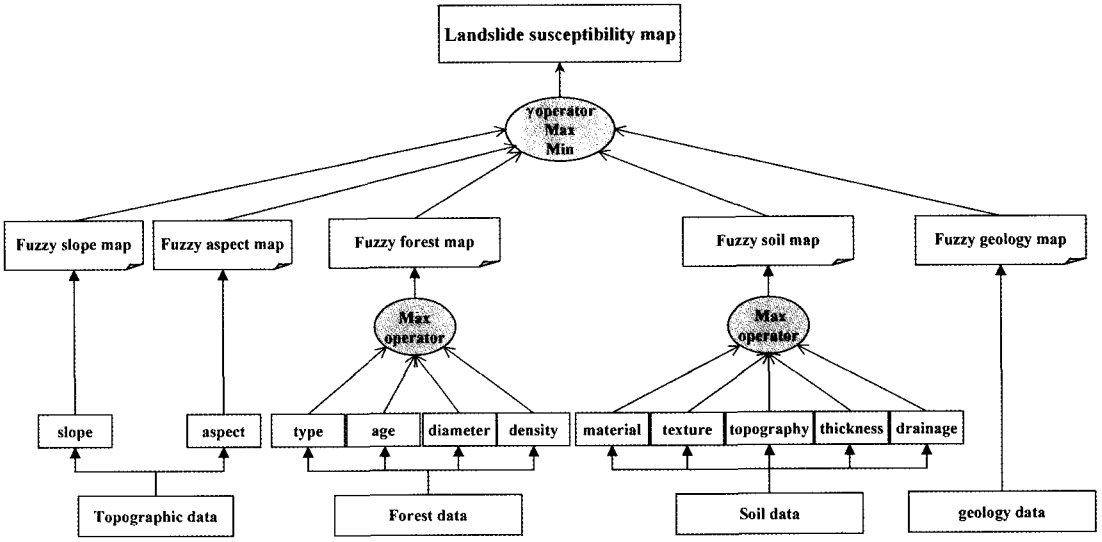

Fig. 6. Fuzzy inference network designed for this study.

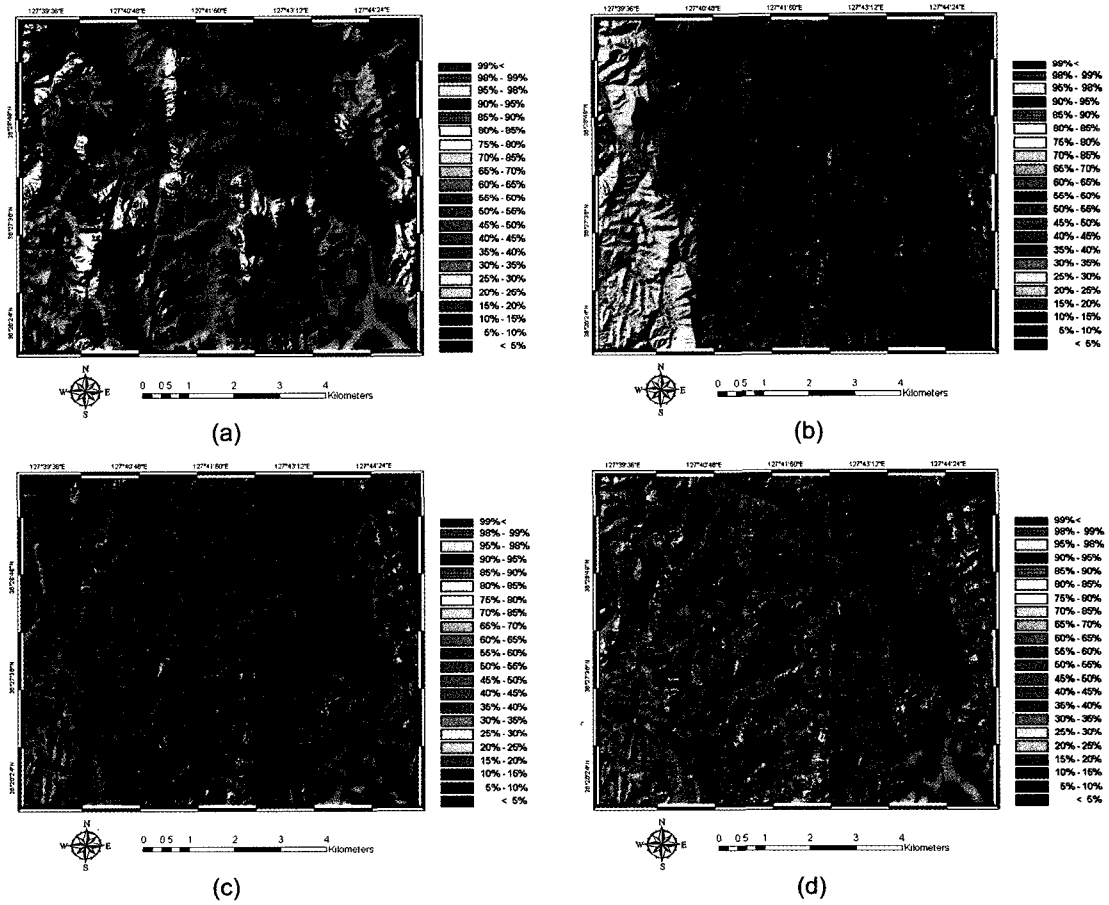

Fig. 7. Fuzzy integration results combined by using (a) max operator, (b) min operator, (c) γ operator (γ=0.1), (d) γ operator (γ=0.9). The background is a shaded relief map.

0.5, 0.9의 3가지 경우를 고려하였다.

Fig. 7은 비퍼지화 과정을 거친 통합결과를 나타낸다. 최대 연산자의 경우 다른 연산자를 사용한 경우와 다른 양상을 나타내고 있다. 연구지역 북부, 중간 지역에서 두드러지게 높은 산사태 취약성을 나타내고 있는데, 이러한 결과는 지질도에서 죽전 화강암이 위치한 곳에 해당되며 이 암상에서 산사태가 집중적으로 일어남으로써 퍼지 소속함수값이 두드러지게 높게 나타나서 최대 연산자를 통해 그 효과가 부각된 것이다. 또한 다른 연산자의 통합결과와 다르게 토양, 임상, 지질도와 같은 범주형 자료의 효과가 두드러지게 나타나고 있으며, 사면 경사의 영향은 상대적으로 작게 나타나고 있다. 만약 특정 범주형 자료의 클래스에서 퍼지 소속함수값이 높다면, 이 효과가 두드러지게 나타나서 마치 다른 자료는 존재하지 않는 것과 같은 효과가 나타나게 된다. 따라서 이러한 결과는 여러 공간자료가 복합적으로 작용하여 발생하는 지질 현상의 설명에는 부적합한 것으로 판단되며, 전체 자료의 통합에 최대 연산자의 사용은 적합하지 않은 것으로 판단된다. 최소 연산자의 경우, 연구지역의 좌측에서 낮은 산사태 취약성을 나타내고 있다. 연구지역의 좌측은 지질도상에서 황강리 퇴적층이 위치하는 곳으로 이곳에서 산사태가 거의 발생하지 않았기 때문에 낮은 퍼지 소속함수 값을 나타내는 지역에 해당된다. 따라서 지질도의 황강리 퇴적층의 낮은 퍼지 소속함수 값이 최소 연산자를 사용함으로써 두드러지게 낮은 산사태 취약성을 나타낸 것이다. 최소 연산자의 경우 모든 지질자료의 특성이 공통적으로 발생한다고 간주하고 최소값을 취하기 때문에 자료의 신뢰성과 질에 대한 확실한 정보가 없을 경우 정보의 사용에 너무 제한적이게 된다. γ연산자의 경우, γ값에 따라서 전반적인 통합결과의 양상은 비슷하게 나타났다. 그리고 최대 연산자와 최소 연산자에서 두드러지게 나타나는 범주형 자료에서 특정 클래스의 부각 효과는 γ값에 따라 절충이 되어 나타나고 있다.

퍼지 연산자의 변화에 따른 통합 결과와 통합에 사용한 과거 산사태 위치에 대한 적합성을 정량적으로 평가하기 위하여 Chung and Fabbri(1999)에 의해 제안된 성공비율곡선(success rate curve)을 작성하였다. 성공비율곡선에서 x축은 (1-클래스값)을 나타내며, y축은 x축에 해당하는 클래스안에 포함되는 과거 산사태의 누적비율을 나타낸다. 만약 과거 산사태에 대한 설명능력이 좋다면, 적은 면적을 차지하는 상위 클래스에서 산사태의 포함 비율이 높을 것이기 때문에 그래프의 모양은 좌상단으로 치우친 모양으로 나타난다.

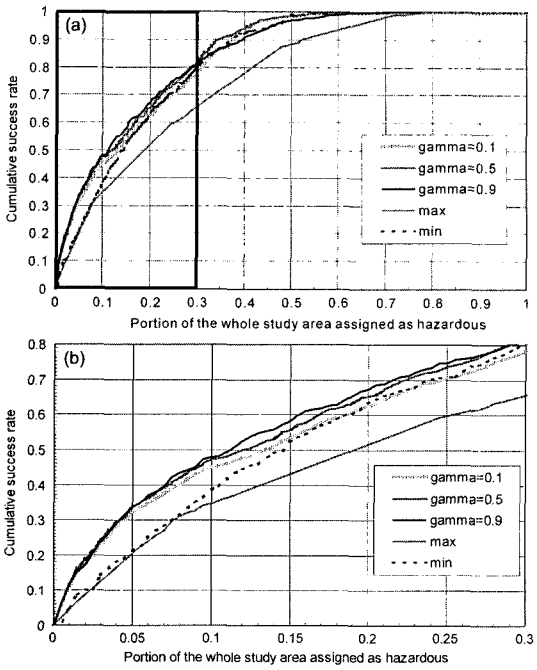

Fig. 8. (a) Success rate curves of 5 fuzzy inference networks. The black rectangle area has been enlarged and is shown in (b).

성공비율곡선을 작성한 결과(Fig. 8), γ연산자를 이용한 통합 결과가 가장 높은 과거 산사태를 설명하고 있는 것으로 나타났으며, 최대 연산자가 가장 낮은 설명 능력을 나타내고 있다. γ값을 0.9를 사용한 통합결과는 연구지역의 상위 10%에 해당되는 취약성이 높은 지역에서 과거 산사태의 약 48%를 포함하고 있으나, 최소 연산자와 최대 연산자를 사용한 통합결과들은 약 38%와 35%만을 각각 포함하고 있다. 이러한 결과는 앞에서 전반적인 통합 결과의 양상을 설명한 것과 마찬가지로, 최소 연산자와 최대 연산자를 사용할 경우, 특정 자료의 효과만이 두드러지게 나타나서 오히려 전반적인 적용 결과의 적합성이 낮게 나타난 것으로 판단된다. γ값의 변화에 따라 성공비율곡선의 차이는 두드러지지는 않지만, γ값이 0.1인 경우 다소 성공비율값이 낮게 나타났다.

3.3. 검증 결과

앞 절에서 계산한 성공비율곡선은 통합 방법의 적합성(goodness of fit)을 나타낸다고 간주할 수 있다. 그러나 통합 결과와 통합에 사용한 산사태를 비교한 것이기 때문에 성공비율은 엄밀한 의미에서 미래의 산사

태 발생에 대한 예측의 검증이라고 볼 수 없다. 예측에 대한 정량적 해석을 위해 과거 산사태를 분할하여 계산하는 예측비율곡선(prediction rate curve)을 작성하였다. 이를 위해 과거 산사태를 임의의 두 그룹으로 나누어 한 그룹은 통합에 사용하고, 나머지 그룹은 통합결과와 비교하는데 사용하였다. 우선 459개의 산사태 발생위치를 무작위적으로 두 개의 그룹으로 나누어서 우선 230개는 통합에 사용하고, 229개는 검증에 사용하였다. 그리고 반대로 검증용 자료를 통합용 자료로, 그리고 통합용 자료를 검증용 자료로서 사용하였다. 이러한 방법으로 2개의 공간통합 결과를 얻게 되고, 459개의 산사태 발생위치에서의 공간 통합 값을 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 값으로부터 성공비율곡선과 마찬가지 방법으로 누적함수 형태인 예측비율곡선을 작성하였다.

Fig. 9는 앞의 방법으로 작성된 예측비율곡선을 나타낸다. 성공비율곡선의 양상과 거의 유사하게 나타나서, γ연산자를 사용한 경우가 다른 연산자를 사용한 경우보다 높은 미래의 산사태에 대한 높은 예측값을 보이고 있다. 이러한 결과는 앞에서 설명한 각 연산자의 특성이 반영된 것이다. γ값을 0.9, 0.5, 0.1을 사용한 통합 결과에서는 상위 10%의 영역에서 각각 46%, 45%, 44%의 예측 능력을 보이고 있다. 이렇게 γ값의 변화에 따라 유사한 예측 능력을 보이는 것은 증가, 감소

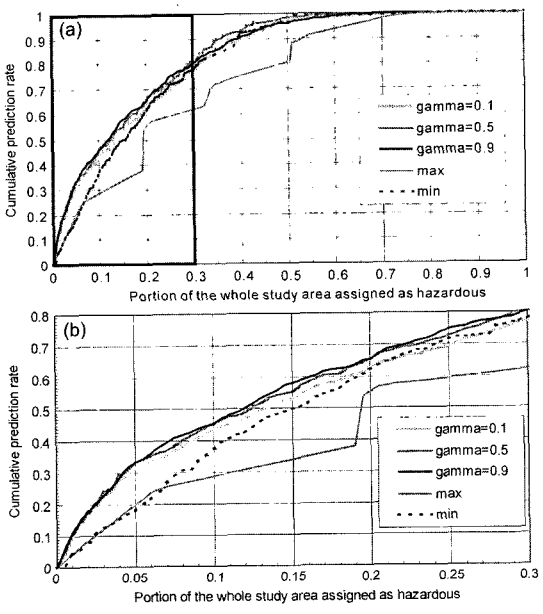

Fig. 9. (a) Prediction rate curves of 5 fuzzy inference networks. The black rectangle area has been enlarged and is shown in (b).

추세와 같은 보상 효과가 본 사례연구지역에 대해서는 γ값의 차이에 따라 두드러지지 않는다고 생각할 수 있다. 이렇게 계산된 예측값을 미래의 산사태와 연관시켜 해석하면 다음과 같다. 연구대상지역에서 상위 10%를 미래의 산사태에 대해서 가장 취약하다고 간주한다면, 미래에 발생할 flow type의 산사태 중에서 46%, 45%, 44%가 그 지역에서 발생할 것으로 해석할 수 있다. 만약 앞으로 지형, 토양, 임상, 지질의 상태에 커다란 변화가 없다고 가정하면, 동일한 자료와 통합 방법론을 사용하였기 때문에 이러한 예측결과는 Fig. 9에 제시한 통합 결과에서 각 클래스의 정량적 해석에 이용할 수 있다.

4. 토의 및 결론

이 논문에서는 다양한 지질자료의 통합을 목적으로 퍼지 이론을 이용한 자료 유도형 통합방법을 제안하고 이에 대해 논의하였다. 제안한 공간통합 방법은 퍼지 소속함수 표현, 퍼지 연산자를 이용한 결합, 비퍼지화, 검증의 4단계로 구성되었다. 기존 퍼지 이론을 적용한 공간 통합 방법과의 차이점은 퍼지 소속함수 표현, 비퍼지화, 검증 단계이며, 산사태 취약성 분석을 통해 각 단계별 과정을 예시하였고, 적용결과의 해석을 시도하였다.

퍼지 소속함수의 표현에서 제안한 자료 표현 방법은 특정 속성에서 발생하는 빈도수에 의존하는 기존 방법에 비해 다른 속성을 고려할 수 있는 장점이 있다. 산사태 취약성 분석을 목적으로 수행한 적용연구 결과, 분석에 사용된 주제도 별로 산사태 발생과 가장 연관성이 높은 클래스를 추출할 수 있었다. 연구대상지역에서는 사면 경사가 25도 이상인 곳에서, 임상 종류도는 리기다 소나무와 잣나무에서, 토양 배수도의 경우 배수가 매우 양호한 경우에서 산사태 발생 가능성이 높은 것으로 나타났다. 각 주제도별로 얻어진 이러한 결과는 기존 국내의 정성적 혹은 정량적 분석결과와 대체적으로 일치하고 있다. 자료유도형 표현 방법은 통합 목표에 대한 정보(기존 광상 위치, 과거 산사태 발생 위치 등)가 대표성을 가질 때 결과의 신뢰도가 증가하기 때문에, 사전에 통합 목표에 대한 공간상의 사전 정보가 불확실한 경우에는 목표 유도형 통합방법과 결합하여 전문가의 의견에 의한 퍼지 소속함수의 변형이 필요하다.

퍼지 소속함수의 결합을 위해 사용한 퍼지 연산자 네트웍은 자료 특성에 따라 여러 연산자를 함께 구성

할 수 있다는 장점이 있다. 현재까지 지질자료의 통합에 있어서 퍼지 연산자의 선택에 대한 준거는 명확하게 제시되지 않았으나, 적용연구에서 사용한 임상자료나 토양자료와 같이 비슷한 공간적 분포를 가지고 유사한 정보를 제공하는 자료를 통합할 때에는 자료 사용을 제한할 수 있는 최대 혹은 최소 연산자가 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 전체 자료의 통합에는 적용연구 결과 γ연산자를 이용한 경우가 연구지역에서 산사태에 가장 취약한 상위 5% 지역에서 최대나 최소 연산자를 수행한 결과보다 약 10% 높은 과거 산사태 설명 능력과 미래의 산사태 예측 능력을 나타내었다. 또한 최대 연산자를 이용한 전체 자료의 통합은 전체 양상에서 다른 연산자를 사용한 결과와 다른 결과를 나타내었고, 특정 부분이 지나치게 강조되는 양상을 나타내었다. 따라서 통합 목표에 대한 전체 자료의 연관성을 함께 고려해야 하는 대부분의 지질학적 응용의 경우에는 모든 자료의 영향을 고려하면서 증가와 감소에 대한 일종의 보상효과를 나타낼 수 있는 γ연산자가 주로 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 기존 An *et al.*,(1991)의 연구에서는 지질 및 지구물리 탐사자료의 통합에서 γ값이 0.975인 경우가 안정적인 해를 제공한다고 보고하였으나, 본 연구에서는 γ값의 변화에 따라 전반적인 통합결과의 양상과 예측 능력에서 2-3% 정도의 차이만을 나타내고 있다. 이는 γ값의 선택이 적용하는 자료에 의존적이라고 해석할 수도 있으며, 증가 혹은 감소의 보상효과가 비퍼지화 단계를 통해 절충되었다고 해석할 수도 있다. 따라서 γ연산자의 적용시 γ값의 변화에 따른 보상효과에 대해서는 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

적용연구에서는 비퍼지화와 검증 단계를 통해 γ연산자를 사용한 경우에 연구지역에서 산사태에 가장 취약한 상위 5%, 10% 지역에서 대략 34%, 46%의 예측 능력과 같은 정량적 결과를 얻을 수 있었다. 비퍼지화와 검증 단계를 통한 예측 능력의 정량화 비교 과정을 통해 입력자료에 대한 민감도 분석도 가능할 것으로 생각된다.

이 논문에서는 산사태 취약성 분석을 목적으로 제안한 방법론에 대해서 예시하였으나, 앞으로 유용광물탐사와 같은 다양한 지질학적 응용분야에 대한 적용가능성 검토 연구가 필요하다. 제안한 자료 표현과 퍼지 연산자 네트워 구성은 통합 목적, 사용 자료에 의존적이기 때문에 다른 응용분야에의 적용을 위해서는 통합 목적 및 자료 특성에 대한 이해가 선행되어야 하기 때문이다. 그리고 앞으로 지질자료의 종류, 통합 목적에 따라 적절한 통합 방법론의 선택할 수 있는 준거 마련과 기존 방법과의 정량화 비교를 위한 많은 적용 연구가 필요할 것으로 생각된다.

사 사

이 연구는 과학기술부의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다. 본문의 설명을 명확히 하는데 도움을 주신 심사위원분들께 감사드립니다.

참고문헌

박노욱 (1999) 다중 지구과학 자료 공간 통합 정보의 분석. 서울대학교 석사학위 논문.

이사로, 민경덕 (2000) 공간 데이터베이스를 이용한 1991년 용인지역 산사태 분석. 자원환경지질, 33권, p. 321-332.

최 경 (1986) 한국의 산사태 발생요인과 예지에 관한 연구. 강원대학교 박사학위 논문.

An, P., Moon, W.M. and Rencz, A. (1991) Application of fuzzy set theory to integrated mineral exploration. Canadian Journal of Exploration Geophysics, v. 27, p. 1-11.

Aronoff, S. (1989) Geographic information systems: a management perspective. WDL Publications, Ottawa, 294p.

Banai, R. (1993) Fuzziness in geographical information systems: contribution from the analytical hierarchy process. International Journal of Geographical Information Systems, v. 7, p. 315-329.

Bonham-Carter, G.F. (1994) Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. Pergamon press, Kidlington, 398p.

Bonham-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. Oxford University Press, New York, 333p.

Carranza, E.J.M. and Hale, M. (2001) Geologically-constrained fuzzy mapping of gold mineralization potential, Baguio district, Philippines. Natural Resources Research, v. 10, p. 125-136.

Choi, S.-W., Moon, W.M. and Choi, S.-G. (2000) Fuzzy logic fusion of W-Mo exploraton data from Seobyeogri, Korea. Geosciences Journal, v. 4, p. 43-52.

Chung, F.C. and Fabbri, A.G. (1993) The representation of geoscience information for data integration. Nonrenewable Resources, v. 2, p. 122-139.

Chung, F.C. and Fabbri, A.G. (1999) Probability prediction models for landslide hazard mapping. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 65, p. 1389-1399.

Chung, F.C. and Fabbri, A.G. (2003) Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. Natural Hazards, in press.

Duda, R.O., Hart, P. and Nilsson, N. (1976) Subjective Bayesian methods for rule-based inference systems. Proceedings of the 1976 national Computer Conference, p. 1075-1082.

Kwon, B.-D. and Oh, S.-H. (2002) Bayesian inversion of gravity and resistivity data: detection of lava tunnel. Journal of the Korean Earth Science Society, v. 23, p. 15-29.

Moon, W.M. (1990) Integration of geophysical and geological data using evidential belief function. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, v. 28, p. 711-720.

Moon, W.M. (1993) On mathematical representation and integration of multiple spatial geoscience data sets. Canadian Journal of Remote Sensing, v. 19, p. 251-255.

Moon, W.M. (1998) Integration and fusion of geological exploration data: a theoretical reivew of fuzzy logic approach. Geosciences Journal, v. 2, p. 175-183.

Parzen, E. (1962) On the estimation of a probability density function and the mode. Annals of Mathematical Statistics, v. 33, p. 1065-1076.

Silverman, B.W. (1986) Density estimation for statistics and data analysis. Chapman and Hall, Florida, 175p.

Zadeh, L.A. (1965) Fuzzy sets. Information and Control, v. 8, p. 338-353.

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.

2003년 5월 22일 원고접수, 2003년 6월 21일 게재승인.