베리오그램을 이용한 중력과 자력 자료의 선형성 및 상관거리 비교 분석

박계순^{1,*} · 박노옥²

¹한국지질자원연구원 광물자원연구본부, 305-350, 대전광역시 유성구 과학로 92

²인하대학교 지리정보공학과, 402-751, 인천광역시 남구 용현동 253

A Comparative Analysis of Linearity and Range of Gravity and Magnetic Data Using Variogram

Gyesoon Park^{1,*} and No-Wook Park²

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 305-350, Korea

²Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

Abstract: To make reliable interpretations on the sparse spatial data, the spatial distribution characteristics that are inevitable for spatial estimation should be properly analyzed. Variograms have been widely used for obtaining the spatial characteristics inherent to data in spatial estimation problems. But their applications were limited as the basic information for further data estimation. Therefore, the additional analysis of the meaning of variograms is required for more reliable data processing and interpretations. In this paper, we investigated the proper meaning of variogram values and the specific features of distributions which can be obtained through variogram analysis. Variograms can provide the information on both linearity and the strength changes of interrelationships between the data sets according to the direction and lag distance. First, sill and range values, which are main parameters of variograms, were analyzed. Then a similarity range using spatial auto-correlation values was introduced to verify the applicability of linearity analysis through the comparative study of spatial distribution features of gravity and magnetic data collected in Hwasan caldera. Through these analyses, we were able to identify the dissimilar patterns of gravity and magnetic data that became apparent according to the distribution and variation ranges of the data sets. It is inferred that the gravity and magnetic anomalous bodies are extended to the ground because linearity direction of gravity and magnetic data appear similarly with linearity direction of topography in Hwasan caldera.

Keywords: variogram, range, similar range

요약: 자료가 부족한 지역에서의 타당성 높은 공간 자료 해석을 위해서는 추정 의 기본 자료인 공간 분포 특성에 대한 올바른 분석이 선행되어야 한다. 공간 추정과 관련해서 자료에 내재된 공간적 특성 척도로 이용 가능한 베리오그램은 자료의 공백을 보완하는 여러 추정 기법의 기초 자료로 그 이용 영역이 제한되어 있는 경향이 있었다. 이에 보다 신뢰성 있는 자료 추정을 위해서는 베리오그램 값이 갖는 의미에 대한 보다 심도 있는 분석이 필요하다. 이 연구에서는 베리오그램 값이 공간 분포 상에서 갖는 의미에 대하여 고찰하고, 베리오그램 분석을 통해 얻을 수 있는 자료의 공간 분포 특성에 대해 연구하였다. 베리오그램은 방향과 분리거리에 따른 자료간의 상관관계 정보를 제공하며, 거리에 따른 상관관계의 변화 정도에 대한 특성을 알려줄 수 있다. 이를 이용하여 베리오그램의 문턱값과 상관거리를 분석하고, 자기상관 값을 이용한 유사거리 개념을 도입하여 선형성 분석의 가능성을 검증하였으며, 화산칼데라 지역에서 획득된 중력 자료 및 자력 자료의 공간 분포 특성을 비교 분석하였다. 분석 결과, 자료의 분포 폭과 변동 폭에 따라 나타나는 중력 자료와 자력 자료의 상이한 특성 패턴을 확인할 수 있었으며, 화산칼데라 지역에서 중력 및 자력의 선형성 방향이 지형의 선형성 방향과 유사하게 나타나고 있어 중력 및 자력 이상체의 지표 연장성이 좋은 것으로 나타났다.

주요어: 베리오그램, 상관거리, 유사거리

*Corresponding author: gyesoon@paran.com

Tel: 82-42-868-3922

Fax: 82-42-868-3922

서 론

물리탐사 자료는 시간과 비용의 한계로 인하여 관심 지역의 모든 위치에서 조밀한 간격의 자료를 획득하기 어려운 본질적 한계를 가지고 있다. 따라서 자료를 획득하지 못한 지역에 대한 자료 값의 올바른 추정에는 타당성 있는 해석을 수행하기 위한 선결 과제라 할 수 있다. 이러한 자료 추정 문제와 관련해서 지구통계학은 시공간 자료의 분포 특성, 공백 자료의 추정 및 신뢰성 분석 기법 등과 관련된 통계적 방법론을 제공할 수 있다(Goovaerts, 1997). 1990년대부터 물리탐사 분야에도 지구통계학의 적용 연구가 활발히 진행 중에 있다(Oh, 2000; Park, 2008).

타당성 높은 공간 자료 해석 과정에서 가장 중요한 선결 과제 중의 하나는 전체 연구지역의 공간 분포 특성을 올바르게 해석하는 것이다. 이러한 공간 분포 특성 값들은 자료에 내재되어 있는 공간적 상호관계와 연속성의 척도를 제공하게 된다. 이러한 공간 분포를 나타내는 척도에는 공분산 함수, 상관그램, 매도그램, 베리오그램 등이 있다(최종근, 2007; Goovaerts, 1997). 앞에 언급된 척도들은 서로 다른 기준으로 관심 공간 내에 분포하는 자료들의 상관성에 대한 정보를 제공한다. 공간 분포 특성을 표현하는 여러 척도들 중에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 척도는 베리오그램이다. 베리오그램은 지구통계학 분야에서 공간 분포의 특성을 정량적으로 설명하기 위하여 오랫동안 사용되어 왔으며, 불규칙적인 간격으로 획득된 자료를 이용하여 원하는 지점에서의 값을 추정하는 각종 크리깅 및 시뮬레이션 기법의 기본 정보로 이용되고 있다(Journel and Huijbregts, 1978; Armstrong, 1984; Cressie, 1993; Olea, 1995; Goovaerts, 1997). 베리오그램은 복잡한 물리탐사 자료의 분포를 거리에 따른 간단한 함수로 표현할 수 있는 장점이 있으나 일반적인 베리오그램 연구는 자료추정의 기초 자료로 활용하는 정도에 그치고 있는 실정으로 베리오그램 값을 통한 자료의 해석 수준은 높지 않은 것이 현실이다. 그러나 베리오그램은 상관거리에 따른 상관관계를 보여줌으로써 상관성이 존재하는 구조의 크기 특성을 제시할 수 있다. 또한 이방성이 존재할 경우 방향에 따라 그 패턴이 상이하게 나타나 구조의 선형성을 제시해 줄 수 있는 등 다양한 공간 분포의 특성을 반영한다.

이 연구에서는 베리오그램이 나타내는 물리적 공간적 특성에 대한 이해를 높이고 현장 물리탐사 자료

들 간 공간 분포의 크기와 선형성의 방향을 분석하고자 한다. 이를 위하여 화산칼데라 지역을 중심으로 수행된 육상 중력 탐사 자료, 항공 자력 탐사 자료 및 지형 자료를 이용하여 각 방향에 대한 실험적 베리오그램을 계산하고 각 베리오그램이 갖는 상관거리 및 선형성의 방향을 분석하였다. 그리고 상관거리 및 선형성의 의미를 물리적으로 해석하여 동일 지역에서 획득된 중력, 자력 및 지형 자료가 갖는 공간적 분포 특성과 상호관계에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 이렇게 해석된 자료는 동일 지역에서 지질도, 지형도, 인공위성 영상 자료를 이용하여 수행된 선형성 분석 연구 결과(박계순 외, 2008)와 비교 분석하여 그 타당성 및 이용 가능성에 대한 검증을 수행하였다.

베리오그램

베리오그램은 일정한 분리거리에 따른 자료들의 상관관계를 나타내는 척도로 다음의 식으로 표현될 수 있다(Goovaerts, 1997; Deutsch and Journel, 1998).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{N(h)} [z(u) - z(u+h)]^2 \quad (1)$$

여기서 $z(u)$ 는 위치 u 에서의 변수 값을, $z(u+h)$ 는 $z(u)$ 에서 h 만큼 떨어진 위치에서의 값을 나타내며, $N(h)$ 는 h 만큼 이격된 자료 쌍의 개수를 나타낸다.

식 (1)에서 보여 지는 것처럼 베리오그램은 공분산 함수, 상관그램 등과 같은 다른 척도들이 주로 일정 분리거리에 따른 유사성을 나타내는데 반하여 일정 분리거리에 따른 비유사성에 대한 척도를 제공하고 있다. Fig. 1은 전형적인 베리오그램의 형태를 보여 주고 있다. 일반적으로 분리거리가 증가할수록 베리오그램 값이 증가하는 패턴을 보이게 된다. 분리거리가 일정이상 증가하게 되면 베리오그램 값이 증가 패턴을 잃고 일정한 값에 수렴하게 된다. 이때의 분리거리와 베리오그램 값을 각각 상관거리(range)와 문턱값(sill)이라 하며, 문턱값은 이론적으로 전체 자료의 분산값에 수렴하게 된다. 이론적으로 분리거리가 0일 경우 베리오그램 값은 0으로 나타나야 하지만, 실제 자료에서는 분리거리가 0일 경우에도 0이 아닌 베리오그램 값이 나타날 수 있는데 이 값을 너깃(nugget)라고 한다. 이 너깃 값은 자료의 분포와 실제 구조와의 분리 해상도 차이나 관측 오차에 의해서 발생할 수 있다.

Fig. 1. A typical variogram model.

베리오그램 식은 기댓값(E) 및 분산(σ^2)과 공분산(Cov)의 정의에 의해서 다음의 식으로 변형이 가능하다.

$$\gamma(h) = \text{Var}[z(u) - z(u+h)] = E\{[z(u) - z(u+h)]^2\} = \sigma^2 - \text{Cov}(h) \quad (2)$$

지구통계학적 분석의 기본 전제인 자료의 불변성(stationarity)은 자료의 분포 특성이 특정한 위치에 따라 변화하지 않는다는 것을 의미한다. 불변성을 고려하면 평균과 분산값은 그 위치에 상관없이 일정한 값으로 고려될 수 있으며, 식 (3)의 상관그램($\rho(h)$)은 식 (2)를 이용하면 식 (4)와 같이 베리오그램과의 관계를 유도할 수 있다(Goovaerts, 1997; Deutsch, 2002).

$$\rho(h) = \frac{\text{Cov}(h)}{\sigma^2} \quad (3)$$

$$\rho(h) = 1 - \gamma(h)/\sigma^2 \quad (4)$$

위의 관계식으로부터 분리거리에 따른 베리오그램의 값은 일정 분리거리를 갖는 값들의 상관관계가 0 일 경우 분산값으로 나타내어지고, 양의 상관관계를 나타낼 경우 분산값보다 작은 값을, 음의 상관관계를 갖는 경우 분산값보다 큰 값을 나타내게 된다.

실험적 베리오그램은 베리오그램 모델링을 통해서 Fig. 1에서 보여 지는 것처럼 전형적인 형태로 가정할 수 있으나, 실제 자료의 특성에 따라서 다양한 형태를 보여지게 된다. 베리오그램에서 나타날 수 있는 다양한 패턴들을 정리하면 다음과 같다(Gringarten and Deutsch, 2001). 1) 무작위적인 형태의 패턴이 나타나는 경우로 공간적인 상관성이 낮은 자료에서 발생할 수 있다. 이러한 형태는 지질학적 요인에 의

해서 발생할 수도 있으나 자료의 잡음이나 샘플링 간격과 구조 크기의 불일치에 의해서 발생할 수도 있다. 2) 분리거리에 따라 변화하는 상관관계의 패턴이 방향에 따라 달라질 수 있는데, 이는 구조적 이방성을 나타낸다. 3) 이론적인 베리오그램과 달리 문턱값이 전체 자료의 분산값에 비하여 비정상적으로 높은 값을 나타내는 경우, 큰 규모의 음의 상관관계를 나타내게 되는데 이는 지질학적 경향성이 반영되어 나타날 수 있는 경우로 보다 타당성 있는 추정을 수행하기 위해서는 이러한 광역적 경향성을 보정해 주는 것이 좋다. 4) 문턱값이 전체 자료의 분산값에 비하여 상당히 낮은 부분에서 형성되는 경우, 분리거리가 증가해도 자료간의 양의 상관관계가 강하게 나타나게 되는데, 이는 자료 값의 변화가 적은 것을 의미하는 것으로 지역적인 유사성이나 층상구조와 같은 형태에서 나타날 수 있는 패턴이다. 마지막으로 5) 베리오그램의 값이 전체 자료의 분산값 부근에서 변동하는 형태가 나타날 수 있는데 이는 분리거리에 따른 자료간의 상관관계가 양의 상관과 음의 상관이 교차되어 나타나는 현상으로 자료의 구조가 유사한 규모로 반복될 경우 나타날 수 있다.

연구지역의 지질개요 및 탐사 개요

탐사 자료의 선형성 분석 및 자료의 공간 분포 특성 연구를 통해 베리오그램 값 자체가 갖는 의미를 해석하기 위해 화산칼데라 지역을 대상으로 획득된 중력 및 자력 탐사 자료 분석을 수행하였다. 화산칼데라는 Fig. 2에 보이고 있는 지질도 중심부의 환상단층대 지역에 분포하고 있다. 환상단층대의 수평 규모는 대략적으로 동서 방향으로 16 km 남북 방향으로 13 km이다. 윤성호(1988)의 연구에 의하면 화산칼데라의 형성 시기는 약 신생대 제 3기초로 알려져 있다. 화산 칼데라 내부의 퇴적암은 약하게 습곡 및 혼펠스화 되었으며, 중심부의 화산암복합체는 유문암질로서 하양층군 위에 놓여 있으며, 중심부 화산암복합체 내부에도 침강 양상을 확인할 수 있는데, 이는 중심부에서 추가적인 내부분출이 있었으며 이에 수반한 반심성 화성작용과 침강에 따른 단층 형성이 있었음을 지시한다(윤성호, 1988; 장기홍과 박순옥, 1997). 화산 칼데라 지역의 전반적인 층서구조는 최하부로부터 낙동-하산동-진주층의 신동층군과 그 상부의 일직-후평동-점곡-사곡-반야월-화산-춘산층으로

Fig. 2. Geological map of the survey area.

Fig. 3. Gravity measurement points on the terrain map. A, B, C and D indicate locations of Palgongsan, Hwasan, Seunamsan and Geumseungsan, respectively.

구성된 하양층군이 위치하고 있다. 중앙부의 유문암질 화산복합체와 화성암 관입체는 가장 최후에 형성된 것으로 연구되었다. 화산 칼데라 지역의 남서부에는 팔공산 화강암체가 북서에서 남동 방향으로 분포하고 있으며, 남동부와 북동부를 중심으로 불국사 화성암류의 관입 구조가 보이고 있다.

이 연구에서는 Fig. 3의 지형도에 표시된 위치의 부계 중력 이상 값과 항공 자력 이상 값을 사용하였다. 육상 중력 자료는 화산칼데라와 금성산 칼데라 일대에서 획득된 자료를 이용하였으며(박계순 외, 2008), 항공 자력 자료는 한국지질자원연구원에서

1980년대 후반부터 1997년까지 측정된 약 150 m 등간격 항공 자력자료를 중력 측정 위치에서 샘플링하여 획득하였다. 중력 자료는 위도보정, 조력보정, 계기보정, 망보정, 후리어보정, 부계보정, 지형보정을 수행하여 지질 구조에 의한 중력 효과만을 추출하여 해석에 사용하였다. 항공자력 자료는 비행측선의 편차에 대한 위치보정, base station을 운영한 후 최소자승법에 의한 기기보정 및 일변화보정, 동서방향의 측선자료와 남북방향의 측선자료간의 기중평균법을 이용한 tie line 보정, 300 m로 고도보정 및 IGRF 보정이 수행된 자료이며, 본 연구에서 RTP 보정을 수

Fig. 4. (a) Bouguer anomaly map(a), (b) magnetic anomaly map (RTP). A, B, C and D indicate locations of Palgongsan, Hwasan, Seunamsan and Geumseungsan, respectively.

행한 후 중력 측점에서의 자료 값을 추출하여 해석에 사용하였다. 연구에 사용된 중력 자료와 자력자료의 분포는 Fig. 4에 각각 나타내었다.

베리오그램 자료 분석

실험 베리오그램 계산

베리오그램을 통한 각 물리탐사 자료의 분포 특성, 구조적 규모 및 선형성을 분석하기 위하여 여러 방향의 중력, 자력, 고도 자료에 대한 실험적 베리오그램을 계산하였다. 선형성에 대한 자세한 분석을 위하여 탐색 방향(angle direction)을 15° 간격으로 변경하면서 각각 계산하였으며, 각도의 허용한계(tolerance) 역시 15°로 제한하였다. 분리거리는 25개의 구역으로 나누어 설정하였으며 분리거리의 허용한계는 분리거리의 50%로 결정하였다. 베리오그램 상에서 각 물리탐사 자료의 상대적인 변화 양상을 손쉽게 비교하기 위하여 하나의 베리오그램 그래프에 각 물리탐사 자료의 분산값이 y축의 같은 높이에 위치하도록 도시하였다. Fig. 5에 제시된 베리오그램들은 위에서 언급된 방식으로 북쪽 방향을 0°로 설정하여 15° 간격으로 계산된 결과이다. 계산된 베리오그램 자료의 효과를 보다 객관적으로 분석하기 위하여 Table 1에 나타난 것과 같이 문턱값을 결정한 후 자료로부터 계

산된 경험 베리오그램을 통해 상관거리를 추정하였다. 이때 문턱값은 중력, 자력, 지형의 값이 변화되는 구조 중에서 가장 작은 단위의 구조를 해석하기 위하여 초기에 나타나던 증가 패턴이 첫 번째로 사라지는 위치로 결정하였다.

베리오그램을 통한 선형성 분석

물리탐사 자료의 분포 특성을 분석하기 위하여 첫 번째로 분석한 내용은 상관거리이다. 상관거리는 분리거리가 커짐에 따라 증가하던 베리오그램 값의 패턴이 사라지는 거리를 나타낸다. 이론적으로는 일정 분리거리 이상이 되면 자료간의 특별한 상관관계가 사라지기 때문에 전체 자료의 분산값에 수렴하게 되지만, 경험 베리오그램에서는 자료의 특성에 따라 이러한 패턴이 상이하게 나타날 수 있어 초기에 나타난 증가 패턴이 사라지는 위치에서 상관거리를 결정하였다. 또한, 이번 연구에서 상관거리는 각 자료들 간의 비교를 용이하게 하기 위하여 전체 연구지역에서는 베리오그램이 계산된 22,000 m를 1로 환산하여 나타낸 값을 이용하였다. 연구지역에서 분석된 베리오그램의 상관거리 값은 Table 2에 나타내었다.

다음으로 식 (4)에 제시된 베리오그램과 분리거리에 따른 자기상관 값과의 상관관계 개념을 이용하여 자료의 상관성이 높게 유지되는 거리를 분석하였다.

Fig. 5. Experimental variograms with respect the changes of direction.

이를 위하여 분산의 불변성 가정 하에 각 분리거리 h 에서 z_h 와 z_{h+h} 와의 상관관계가 0.3 이상으로 유지되는 분리거리를 추정하였으며 편의상 이를 유사거리라고 지칭하였다. 이때 상관관계의 기준을 0.3으로 결정한 이유는 각 방향의 베리오그램에서 나타나는 여러 문턱값과 전체 지역의 공분산값의 비율을 고려하

여 설정하였다. 이 유사거리가 의미하는 바는 전체적인 자료의 분포 특성을 고려할 때 자료 값의 변화가 크지 않은 거리로 선형성의 방향 및 구조적 크기를 지시할 수 있는 척도를 나타내게 된다.

분석 결과는 Fig. 6에 보이는 것처럼 방사형 그래프를 이용하여 도시하였다. 모든 자료는 방향에 따른

Table 1. Variogram analysis results of the whole survey area

Angle	Sill values (Gravity)	Sill values (Magnetic)	Sill values (Elevation)
0	11.3	32000	11700
15	13.2	24000	12500
30	16.8	24000	12000
45	17.2	22500	10500
60	13.2	23000	13000
75	11.0	30500	15000
90	9.2	25000	15500
105	7.5	26000	18000
120	6.7	25000	16000
135	6.1	24500	9500
150	6.7	26000	13500
165	8.5	29800	11700

변화하는 모습을 보여주고 있으며, (a)는 문턱값, (b)는 상관거리, (c)는 유사거리의 값을 보여주고 있다. 문턱값의 경우 비교의 편의성을 위하여 전체 자료의 분산값에 대한 비율로 표현하였다. (a)에서 보이고 있는 문턱값의 양상은 전체 자료의 분산값을 중심으로 나타나고 있으나, 중력 자료의 경우 15-60° 방향의 강한 선형성을 보여주고 있다. 이는 중력 자료의 실험적 베리오그램 값이 발산하는 패턴을 보여주는 방향과 일치하고 있다. 베리오그램의 특성을 고려할 때 이는 중력 자료에서 북동에서 남서 방향으로의 광역 패턴이 나타나고 있음을 추정할 수 있다. 다음으로 (b)가 나타내는 상관거리의 패턴을 살펴보면, 분리 거리에 따른 자료간의 음의 상관관계가 크게 나타나고 있는 30-75° 방향의 중력 자료와 15° 방향의 자력자료에서 큰 상관거리를 보여주고 있다. 중력 자료의

경우 이러한 영향으로 전반적인 상관거리의 선형성 방향이 북동에서 남서방향으로 나타나고 있으나, 자력 자료와 지형 자료의 경우 중력 자료의 패턴과는 달리 전반적인 상관거리의 선형성 방향이 북서에서 남동방향으로 나타나고 있다. (c)의 유사거리는 앞에서 언급한 것처럼 자료간의 유사성이 강하게 나타나는 범위를 지시하는 척도로 선형성 검증에 효과적으로 사용될 수 있는데 중력 자료, 자력 자료, 고도 자료 모두에서 120-150° 방향으로 강한 선형성을 보여주고 있다.

위 결과를 종합하였을 때, 중력 자료와 자력 및 지형 자료의 유사거리를 통한 선형성 검증에서 모두 120-150° 방향의 강한 선형성을 보여주고 있으나 상관거리에서는 패턴이 서로 상이하게 나타났다. 중력 자료의 경우 상관거리와 유사거리의 선형성 방향이 서로 수직에 가까운 양상을 보이고, 자력 및 고도 자료에서는 유사한 선형성을 보여주고 있다. 이러한 베리오그램의 특성은 중력 자료와 자력 자료의 분포 특성을 반영한 결과로 해석될 수 있다. 상관거리는 분리 거리에 따른 상관성이 없어지는 거리이며, 유사거리는 비슷한 값들이 분포하는 거리를 의미한다. 즉, 유사거리의 분포를 고려하면 중력, 자력 및 고도 자료 모두에서 북서-남동방향으로 상관성이 높은 비슷한 값들이 길게 분포하는 선형성을 보이고 있지만, 중력 자료의 경우 상관거리와 유사거리가 양의 상관관계를 보이는 자력과 고도 값과 달리 상관거리와 유사거리가 서로 강한 음의 상관관계를 보이고 있다. 이는 중력 자료가 자력이나 고도 값에 비하여 변화가 적고 단순한 패턴을 보이기 때문에 선형성이 존재하는 방향에서 자료들 간의 상관관계는 높은 양의

Table 2. Variogram analysis results of the whole survey area

Angle	Range (Gravity)	Range (Magnetic)	Range (Elevation)	Distance (p>0.3) (Gravity)	Distance (p>0.3) (Magnetic)	Distance (p>0.3) (Elevation)
0	0.38709	0.53360	0.39986	0.33333	0.33333	0.23991
15	0.46707	0.81384	0.41330	0.31989	0.28024	0.23991
30	0.62701	0.46707	0.30645	0.33333	0.26545	0.25336
45	0.80040	0.41330	0.22647	0.39986	0.25336	0.23991
60	0.90658	0.38709	0.23991	0.41330	0.22647	0.20026
75	0.72043	0.30645	0.21371	0.42674	0.21371	0.18682
90	0.69354	0.66666	0.20026	0.49328	0.22647	0.18682
105	0.46707	0.58669	0.23991	0.61357	0.25336	0.21371
120	0.34677	0.50672	0.29368	1.00000	0.29368	0.22647
135	0.30645	0.60013	0.18682	1.00000	0.38709	0.28024
150	0.26680	0.64045	0.57325	1.00000	0.44018	0.31989
165	0.26680	0.68010	0.66666	0.74664	0.44018	0.31989

Fig. 6. Variogram analysis results. (a) sill values, (b) range, and (c) separation distance that has more than 0.3 correlation value.

Fig. 7. The extracted lineaments: (a) displays fault lines in the geologic map, (b) and (c) show the lineament extracted from DEM and Landsat image, respectively (Park et al., 2008).

상관관계를 가지지만, 베리오그램의 기울기가 0이 되는 상관거리는 짧게 나타나기 때문이다. 이에 반하여 자력이나 고도 값은 자료의 범위가 넓고 중력에 비하여 훨씬 복잡한 분포를 갖기 때문에 방향성이 존재하는 방향에서도 전체 자료의 분산값과 유사한 분산값을 나타내고 상관거리가 일정 이상 길게 나타나는 특성을 보인다. 이로 인해 상관거리와 유사거리 모두 비슷한 패턴을 보이게 되는 것으로 판단된다.

선형성 검증

위에서 언급된 각 자료의 선형성 방향을 검증하고 지표의 선형성과의 상관관계를 살펴보기 위하여 동일 지역에서 이루어진 원격 탐사 자료를 통한 선형성 분석 연구 결과와 비교해 보았다. 원격 탐사 자료 분석은 연구지역의 광역적인 지질구조를 파악하기 위해 GDPA(Gradient Direction Profile Aogorithm) 기법 (Wang and Zhang, 2000; Lee and Yu, 2002)을 이용

해, DEM, Landsat 영상으로부터 선구조를 추출하고 기존의 지질도에 표시된 단층선과 함께 그 선형성에 대한 연구를 수행한 결과이다 (박계순 외, 2008). 각 자료에서 추출된 선형성은 Fig. 7에 나타내었으며, Fig. 8의 로즈다이어그램으로 그 선형성의 방향을 확인할 수 있다. 지질 단층선의 경우 화산에서 환상의 단층이 나타나기도 하지만 전반적으로 북서에서 남동 방향으로 길고 뚜렷한 단층선이 존재하여 120-130° 방향으로 강한 경향성을 보인다. 또한, DEM에서 얻은 선구조는 비교적 고른 방향으로 존재하나 주된 방향은 0-10°와 120-140° 방향이다. 그리고 Landsat 영상으로부터 얻은 선구조는 40-60°와 130-140° 방향이 우세하다. 공통적으로는 130° 부근에서 강한 선구조가 나타나고 있으며, 세 자료를 통합하면 0-10°와 130-140° 방향으로 가장 우세한 결과로 분석되었다.

우선 지형 자료 베리오그램의 유사거리를 통한 선형성 분석 결과와 고도 자료인 DEM 원격탐사 자료

Fig. 8. The rose diagrams of lineaments in study area: (a), (b) and (c) results from each lineament in (d) represents all lineaments (a, b, and c) by one rose diagram (Park et al., 2008).

를 통한 선형성 분석 결과가 높은 상관관계를 보이고 있기 때문에 베리오그램의 유사거리를 이용한 선형성 분석의 타당성을 확인할 수 있었다. 물론 지형 자료의 경우 상관거리의 선형성 방향에서도 유사한 특성을 보이고 있지만, 상관거리 보다는 유사거리에서 훨씬 강한 선형성을 지시하고 있어, 실제적으로도 베리오그램을 통한 선형성 해석 시 상관거리 보다는 유사거리가 보다 더 효과적임을 확인할 수 있었다. 또한, 중력 및 자력 자료 베리오그램의 유사거리를 이용한 선형성 분석 결과도 이와 높은 상관관계를 나타내어서, 이 지역에서 밀도 이상 및 대자율 이상 구조가 지표의 선형 구조와 상당한 상관관계를 갖는 것으로 해석되었다. 이를 통하여 연구지역의 밀도 및 대자율 이상 구조체가 지표로의 연장성이 높은 것으로 판단할 수 있는 근거를 제시할 수 있다. 또한, 베리오그램의 상관거리와 문턱값을 이용하여 중력, 자력 및 고도 자료의 분포 특성을 이해할 수 있는 기초 자료를 제공할 수 있음을 확인할 수 있었다.

결론

베리오그램은 공간 자료의 분포 특성을 설명해주는 척도로 널리 사용되고 있는 지표이다. 현재 베리오그램의 분포 특성은 자료 공백을 보완하는 여러 추정 기법의 기초 자료로 그 이용 영역이 제한되어 있는 실정이며, 보다 신뢰성 있는 자료 추정을 위해서는 베리오그램 값이 갖는 의미에 대한 보다 심도 있는 분석이 필요하다. 이 연구에서는 베리오그램의 문턱값 및 상관거리와 함께 유사거리 개념을 도입하여 자료의 선형성 및 분포 특성 분석을 수행하였다. 선형성 분석 결과는 동일 지역에서 원격탐사 자료를 이용한 선형성 분석 결과와 비교하여 그 효용성을

검증하였으며, 상관거리와 유사거리의 상호 상관성을 이용하여 중력 자료와 자력 자료의 분포 특성을 해석하였다.

중력 자료는 자력 자료에 비하여 값의 변화가 적고 저주파의 특성을 갖는다. 이로 인하여 분리거리에 따른 자기상관 값이 좋은 방향 즉, 유사거리가 길게 나타나는 방향에서 특정 범위의 유사한 값들이 분포하며 베리오그램의 변화 양상이 쉽게 감소하여 짧은 상관거리를 나타내었다. 반면 자료의 분포 영역이 넓고 구조에 민감하여 복잡한 특성을 갖는 자력 자료에서는 상관거리와 유사거리의 특성이 유사하게 나타나는 특성을 보인다. 이는 선형성이 존재하는 방향에서도 베리오그램 값이 일정 이상 증가하는 특성을 보여 중력 자료의 분포 특성과 대비 되었다. 즉, 자력 자료에서는 분산값의 불변성이 중력 자료에 비하여 높은 수준에서 유지되었지만, 중력 자료에서는 분산값의 불변성이 이방성 구조에 따라서 유지되지 않는 특성을 확인할 수 있었다. 또한, 화산칼데라 지역에서 중력 및 자력의 선형성 방향이 지형의 선형성 방향과 유사하게 나타나고 있어 중력 및 자력 이상체의 지표 연장성이 좋은 것으로 판단된다. 결론적으로 단순히 기초 자료로서의 베리오그램 분석이 아니라 중력 자료와 자력 자료의 선형성 분석 및 자료의 공간 분포 특성 연구를 통해 베리오그램 값 자체가 갖는 의미를 보다 자세하게 해석할 수 있으며, 화산칼데라 지역에서 나타나는 중자력 자료의 분포 특성을 비교 분석할 수 있었다.

사사

이 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지자원기술개발사업(R200811135)의 지원에 의해 수행되었으며,

이에 감사드립니다. 박노옥의 참여는 국토해양부 첨단 도시기술개발사업 - 지능형 국토정보기술혁신사업과제의 연구비 지원(07국토정보C03)에 의해 수행되었습니다. 또한 심사를 맡아 논문의 질을 높여주신 이희순, 오석훈 교수님과 익명의 심사자 분께 감사드립니다.

참고문헌

- 박계순, 류희영, 양준모, 이희순, 권병두, 엄주영, 김동오, 박찬홍, 2008, 포텐셜 자료해석을 통한 화산칼데라 구조 해석. 한국지구과학회지, 29, 1-12.
- 윤성호, 1988, 화산 환상화성암복합체의 발달사 및 콜드론 구조. 대한지질학회지, 24, 267-288.
- 장기홍, 박순옥, 1997, 경상분지 중앙부의 구조발달사와 화산활동사. 자원환경지질, 30, 143-151.
- 최종근, 2007, 지구통계학. 시그마프레스, 서울, 386 p.
- Armstrong, M., 1984, Improving the estimation and modeling of the variogram. In Verly, G., David, M., Journel, A.G. and Marechal, A., (eds.), 1984, Geostatistics for Natural Resources Characterization. Reidel, Holland, 1-20.
- Cressie, N., 1993, Statistics for spatial data. Wiley, NY, USA, 900 p.
- Deutsch, C.V., 2002, Geostatistical Reservoir Modeling. Oxford University Press, NY, USA, 376 p.
- Deutsch, C.V. and Journel, A.G., 1998, GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide. Oxford University Press, NY, USA, 369 p.
- Goovarets, P., 1997, Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, NY, USA, 483 p.
- Gringarten, E. and Deutsch, C.V., 2001, Variogram interpretation and modeling. Mathematical Geology, 33, 507-534.
- Journel, A.G. and Huijbregts, Ch.J., 1978, Mining geostatistics. Academic Press, NY, USA, 600 p.
- Lee, K. and Yu, Y.-C., 2002, Automatic extraction of road network using GDPA (Gradient Direction Profile Algorithm) for transportation geographic analysis. Proceedings of International Symposium on Remote Sensing, 775-779.
- Oh, S., 2000, Geostatistical approach to Bayesian inversion of geophysical data. Ph.D. Thesis, Seoul National University, 99 p.
- Olea, R.A., 1995, Fundamentals of semivariogram estimation, modeling, and usage. In Yarush, J.M. and Chambers, R.L. (eds.), Stochastic modeling and geostatistics: Principles, methods, and case studies. AAPG Computer Applications in Geology, 3, 27-36.
- Park, K., 2008, Geostatistical integration of multi-parametric geophysical data to enhance spatial resolution. Ph.D. Thesis, Seoul National University, 120 p.
- Wang, J. and Zhang, Q., 2000, Applicability of a Gradient profile algorithm for road network extraction-sensor, resolution and background considerations. Canadian Journal of Remote Sensing, 26, 428-439.

2010년 1월 2일 접수
2010년 3월 5일 수정원고 접수
2010년 3월 12일 채택