

## 한반도의 지반운동 (II): 한반도 지진분포의 지형학적 해석

박수진\*

### Tectonic Movement in the Korean Peninsula (II): A Geomorphological Interpretation of the Spatial Distribution of Earthquakes

Soo Jin Park\*

**요약** : 이 연구는 한반도에서 발생하고 있는 지진의 분포특성을 통하여 지반운동의 공간적인 차별성을 증명함과 동시에, 지진다발지역의 형성 메카니즘을 규명하는 것이 목적이다. 전편의 논문(박수진, 2007)에서는 지형분석을 통해 한반도에는 지역적인 지형특성을 결정하는 4개의 지반운동구가 존재한다는 사실을 보여주었다. 상기의 연구는 수치고도모델의 분석에 전적으로 의존하고 있어, 지구물리자료를 통해 그 결과를 검증하는 작업이 필요하다. 지진은 지각이 이동 혹은 변형되는 과정에서 발생하는 현상으로, 진앙의 분포는 지반운동의 방향성과 분포를 반영해주는 직접적인 증거가 될 수 있다. 이 연구에서는 한반도의 지진분포를 공간통계기법을 통해 분석하였으며, 그 결과를 지반운동구의 공간적인 배열과 비교·평가하였다. 한반도에서 지진발생의 공간적인 특성은 세 가지로 요약될 수 있다. 첫째, 지진의 규모는 약한 공간적인 의존성만을 보이고 있으며, 인접한 지역에서도 지진의 규모는 큰 차이를 보일 수 있다. 둘째, 지진의 규모는 공간적으로 무작위성에 가까운 분포를 보이는 반면, 진앙의 분포는 뚜렷한 공간적 밀집현상을 보이고 있다. 셋째, 한반도에서의 지진다발지역은 'L'자형의 밀집현상을 보이고 있다. 육지부분에서는 평양시를 중심으로 한 평안남도 와 황해도, 그리고 서산과 포항을 잇는 선을 따라 지진이 밀집되어 있다. 지진밀도가 지체구조선에서의 거리, 주요단층선의 밀도, 그리고 지반운동구 경계선에서의 거리 등과 가지는 상관관계를 살펴본 결과, 지반운동구의 경계선이 지진다발지역을 가장 잘 설명하는 것으로 나타났다. 단층선이나 지체구조선은 오랜 기간을 통해 형성되었기 때문에, 이들 요인을 이용하여 현재의 지진다발지역을 설명하기에는 시간적인 스케일의 문제가 존재한다. 한반도를 구성하는 4개의 지반운동구는 서로 다른 이동방향과 변형특성을 보이기 때문에, 그 경계부에서 지진이 발생할 수 있는 가능성이 높은 것으로 해석된다. 지반운동의 공간적인 차별성은 GPS 자료를 통한 지각의 이동방향에 의해서도 간접적으로 증명될 수 있었다. 이러한 해석은 기존에 알려져 왔던 한반도의 지진발생 메카니즘과는 차이를 보이는 것으로, 한반도의 지형발달과 지진예측에 새로운 시각을 제시할 것으로 기대된다.

**주요어** : 지진, 지반운동, 단층선분포, 지체구조, 지형분석, 공간통계, GPS

**Abstract** : The purposes of this research are twofold; 1) to verify spatial differences of tectonic movement using the spatial distribution of earthquakes, and 2) to infer mechanisms that generate spatial accumulation patterns of earthquakes in the Korean Peninsula. The first part of this sequential paper (Park, 2007) argues that the Korean Peninsula consists of four geostructural regions in which tectonic deformation and consequent geomorphological development patterns are different from each other. Since this conclusion has been made by terrain analyses alone, it is necessary to verify this suggestion using other independent geophysical data. Because earthquakes are results of movement and deformation of land masses moving in different directions, the distribution of earthquake epicenters may be used to identify the direction and rates of land mass movement. This paper first analysed the spatial

\*서울대학교 지리학과 부교수(Associate Professor, Department of Geography, Seoul National University), catena@snu.ac.kr

distribution of earthquakes using spatial statistics, and then results were compared with the spatial arrangement of geostructural regions. The spatial distribution of earthquakes in the Korean Peninsula can be summarized as the followings; firstly, the intensity of earthquakes shows only weak spatial dependency, and shows large difference even at adjacent regions. Secondly, the epicenter distribution has a clear spatial accumulation pattern, even though the intensity of earthquake shows a random pattern. Thirdly, the high density area of earthquakes shows a clear 'L' shape, passing through Pyeongannam-do, centered at Pyeongyang, and Hwanghae-do, Seosan and Pohang. The correlation coefficient between the density of earthquakes and distance from geostructural region boundaries is much higher than those between the density of fault lines and distance from tectonic division boundaries. Since fault lines and tectonic divisions in the Korean Peninsula are the results of long-term geological development, there is an apparent scale discrepancy to find significant correlations with earthquakes. This result verifies the research hypothesis that the Korean Peninsula is divided into four geostructural regions in which each has its own moving direction and spatial deformation characteristics. The existence of geostructural regions is also supported by the movement patterns of land masses estimated from the GPS measurements. This conclusion is expected to provide a new perspective to understand the geomorphological developments and the earthquake occurrences in the Korean Peninsula.

Key Words : earthquake, tectonic movement, distribution of faults, geostructural region, terrain analysis, spatial statistics, GPS

## 1. 서론

한반도의 지형은 어떤 과정을 거쳐서 만들어졌을까? 한반도 지형의 근간이 지반의 움직임에 의한 것이라면, 지반운동을 야기시킨 원인은 무엇인가? 한반도를 형성한 지반운동은 공간적으로 어떠한 특성을 지니고 있는가? 이러한 질문들은 한국지형을 이해하는 데 있어 가장 기초적인 질문들이다. 하지만, 한반도의 지반운동에 대한 연구는 극히 초보적인 단계에 머물고 있으며, 이러한 질문들에 답할 수 있는 자료 역시 절대적으로 부족한 것이 현실이다.

한반도의 구조운동과 그 시기에 대한 지질학적인 해석은 김옥준(1982), 장기홍(1985), 그리고 대한지질학회(1999) 등에서 잘 정리되고 있다. 한반도의 암석은 시생대에서부터 신생대에 이르기까지 긴 지질시대를 거쳐 형성되었으며, 그 과정에서 구조운동의 역사는 서로 중첩되어 각각의 구조운동이 현 지형에 미친 상대적인 영향력을 파악하기는 쉽지 않다. 그 결과, 한반도의 지반운동을 설명하는 지형학적 이론들은 지질학적 구조운동과 현재의 지형특성을 통해 장기적인 지형 발달사를 정리하는 수준에 머물고 있다.

立岩巖(1976: 양승영(역), 1996)은 한반도를 포함한 극동아시아 지형의 특성은 중생대 중기 이후 단계적으

로 발달한 경동지형이라고 주장하였다. 이러한 경동지형은 주요한 산지의 능선을 따라 평행하게 나타나는 정단층을 수반한 요곡운동에 의해서 형성되었으며, 이러한 요곡운동을 지향사 조산운동의 관점에서 해석하고자 하였다(양승영, 1996, 398-401). 반면, 김상호(1977)는 판구조론적 해석을 통하여 한반도 요곡운동은 백악기에 침식면<sup>1)</sup>이 형성된 후, 주로 확장형식의 지각운동을 하는 과정에서 불국사변동에 속하는 지괴운동(정단층)과 네오텍토닉(Neo-tectonic)<sup>2)</sup>의 요곡적 상승을 통해 현재의 지형이 만들어졌다고 설명하고 있다(김상호, 1977). 조화룡(1982)은 한반도의 지형발달 과정을 일본열도의 생성·이동과 관련시켜 기술하고 있다. 즉 중생대 중기까지는 한반도가 대륙연변부에 위치하고 있었기 때문에 압축력이 우세하여 주로 습곡운동(삼첩기의 송림운동과 류라기 중기의 대보운동)이 이루어졌다. 반면, 중생대 중기 이후에는 한반도가 일본열도의 후면에 위치하면서 압축력보다는 확장력이 우세한 구조운동을 경험하면서, 불국사운동(중생대말-제3기초)과 단층운동(제3기 중기)이 발생하였다고 보고 있다. 특히, 제3기 중기의 단층운동은 한반도 지형의 원형을 형성하는데 중요한 역할을 한 것으로 기술하고 있다. 즉, 정단층과 정단층을 동반한 요곡 및 경동운동을 통해 태백산맥과 개마고원을 중심으로 북서

쪽으로 기울어진 지형의 원형이 만들어졌다고 보는 것이다.

최근 각종 지구물리자료(부계이상, 중력이상)의 축적과 GPS(Global Positioning System)를 통한 지각의 변형에 대한 정보들이 축적되면서, 지각의 움직임을 결정하는 응력의 분포와 지반운동의 특성을 설명하려는 연구들이 다수 발표되고 있다(Chough *et al.*, 2000; Choi, 2001; 최범영 외, 2003b; Hamdy *et al.*, 2005; 신영홍 외, 2006; Jin and Park, 2006; Jin *et al.*, 2006). 이러한 연구결과는 향후 한반도 지반운동의 원인과 분포를 밝히는 데 있어 중요한 정보를 제공해 줄 것으로 보인다. 하지만, 이들 연구에서 보고된 실측지점은 대부분 한반도 남부지역에 국한되어 있고 측정기간 역시 단기간에 머물고 있어, 한반도 차원에서의 지형특성을 결정하는 지반운동의 공간적인 분포, 지반운동의 시기, 그리고 그 원인을 추정하기에는 아직도 자료가 충분치 못하다.

최근 박수진(2007)은 수치고도모델(Digital Elevation Model, 이하 DEM)의 분석을 통해 지반운동의 공간적인 특성을 파악하고자 하였다. 상기의 연구에서는 지반운동과 지표사박작용간의 상관관계를 이론적으로 검토한 뒤, 일련의 지형분석기법을 통하여 과거 존재했을 것으로 추정되는 지형면들을 추출하였다. 추출된 지형면의 공간적인 배열을 분석한 결과, 한반도는 지반운동의 분포와 방향성, 그리고 운동의 시기 면에서 뚜렷한 차이를 보이는 4개의 지반운동구(geostrucral regions)가 존재한다고 주장하였다. 이러한 결과는 한반도 지반운동의 공간적인 분포특성을 가시적으로 보여주는 것으로, 지형형성과정을 해석함과 동시에 지역적인 지형의 차이를 설명하는 유용한 개념들을 제공해 줄 것으로 기대된다. 하지만, 상기의 연구결과는 수치고도모델을 이용한 지형분석에 전적으로 의존하고 있다는 한계를 가지고 있다. 제시된 연구결과가 신뢰성을 가지기 위해서는, 지반운동에 의해 형성된 것으로 보이는 각종 지형요소들(하안단구, 해안단구, 갑입곡류천, 침식분지 등), 지질암석특성, 그리고 지구물리자료 등과의 비교를 통한 검증작업이 필요하다.

이 연구는 한반도에서 발생한 지진의 분포특성을 이용하여, 박수진(2007)에서 제기된 지반운동의 공간적

인 차별성을 검증하는 것이 일차적인 목적이다. 지진을 일으키는 원인은 지각이 움직이는 방향과 양의 차이에서 찾을 수 있다. 즉, 지반운동의 상대적인 차이로 인해 지하에 응력이 축적되고, 축적된 응력이 지각 혹은 암석의 파괴강도보다 커지면 지진이 발생하게 된다(Burbank and Anderson, 2001; 김소구, 2004). 따라서 진앙이 특정지역에 밀집하여 분포하고 있다면, 이곳은 곧 방향성이 다른 두 개 혹은 세 개의 지반들이 서로 맞물리는 곳으로 이해할 수 있다.

이 연구에서는 먼저 한반도에서 발생한 지진분포에 대한 기존의 연구 결과들을 정리하였다. 기존의 지진연구에서는 탄성반발설에 근거하여 단층선 혹은 지체구조선과의 관련성에서 지진의 원인을 찾는 시각이 주류를 이루고 있다. 이러한 시각을 검증하기 위하여 공간통계기법(spatial statistics)을 사용하여 한반도 지진의 공간적인 분포를 분석하였으며, 그 결과를 단층선의 밀도, 지체구조선에서의 거리, 그리고 지반운동경계선에서의 거리와 비교·평가하였다. 한반도에서 진앙의 밀집지역은 단층선이나 지체구조선보다는 지반운동의 경계선과 밀접하게 연관되어 있다는 사실이 밝혀졌다. 이 연구에서 전제하고 있는 지반운동의 지역적인 차이는 최근에 발표된 한반도 남부의 GPS 자료에 의해서도 검증될 수 있었다. 이러한 결과는 한반도로 전달되는 응력이 각 지반운동구의 이동과 변형의 차이를 가져오고, 그 과정에서 지반운동구의 경계면에서 다수의 지진이 발생하는 것으로 해석될 수 있다.

## 2. 지진의 분포와 발생에 관한 연구 성과 및 문제점

한반도는 유라시아(Eurasia)판 내부에 위치하고 있기 때문에 발생하는 지진의 대부분이 판내지진의 특성을 가지고 있다. 판내지진은 판경계부에서 나타나는 지진에 비해 발생 메커니즘이 복잡하고 불분명하다(이기화, 1998; 지현철, 2005). 특히, 한반도 주변에서는 인도판과 태평양판, 그리고 필리핀판이 각각 히말라야 산맥, 일본해구, 류구해구에서 유라시아판과 충돌하고

있어 매우 복잡한 응력관계를 보이고 있다.

지진의 발생원인으로는 탄성반발성이 가장 유력하게 제시되고 있다(김소구, 2004). 이 가설은 지하에 응력이 축적되어 암석의 파괴가 발생하게 되면, 단층운동과 더불어 지진이 발생한다는 것이다. 따라서 단층과 관련된 구조선은 과거 지진이 발생한 흔적으로 간주되며, 일단 형성된 구조선은 약성대를 형성하여 응력의 집중이 상대적으로 쉽게 일어나 지진의 발생이 더욱 빈번해진다고 보고 있다(김성균·백장선(2000)에서 재인용).

한반도를 대상으로 이루어진 기존의 연구들은 이러한 탄성반발설에 근거하여 지진의 분포와 그 발생 메카니즘을 해석하고자 하였다(Lee and Jung, 1980; Lee et al., 1986; 경재복, 1993). 경재복(1993)은 한반도 남부의 지진분포가 뚜렷한 밀집현상이나 대상분포를 보이지는 않는다고 주장하면서, 선구조선의 밀집도가 높은 곳, 특히 산악지대와 저지대의 인접지에서 지진발생이 높은 것으로 보고하고 있다. 이기화(1998)는 역사지진자료를 분석하면서 대부분의 지진들이 주요단층선이나 지체구조구의 경계에서 발생하는 것으로 해석하였다. 하지만, 이기화·김정기(2000)는 한반도를 구성하고 있는 지체구조구들 사이의 지진발생이 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않는다고 보고하고 있다. 윤순옥 외(2001)는 한반도의 지진발생지역과 기반암과의 상관관계를 분석하였지만, 지진발생지역이 특정 기반암에 집중적으로 분포하지는 않는다고 하였다.

이상의 연구들이 전제하고 있는 지진과 지체구조선 혹은 단층선과의 상관관계는 현재 가설수준에만 머물고 있으며, 한반도의 지진분포를 설명하기에는 통계적 상관관계가 낮은 것이 사실이다. 전명순(1995)은 한반도 남부지방에서는 서산과 포항을 잇는 선(N60-70°W 방향)을 중심으로 그 주변 100km에 약 80%의 지진이 집중되고 있다고 하였다. 반면, 북부지방에서는 진양이 서울-원산을 잇는 선의 서쪽에 한정되어 있으며, N20°E 방향성을 보이고 있다고 보고하고 있다. 이 두 개의 지진대는 서해쪽으로 연장되어 경기만 근처에서 거의 직교하는 형태를 보여, 전체적으로는 'L'자형 분포를 보인다고 주장하였다. 김성균·백장선(2000)은 한반도의 역사지진과 계기지진자료를 공간분석기법을

통해 분석하면서, 한반도의 지진발생은 무작위적이지 않고 군집적인 분포를 가지고 있다고 주장하였다. 이 연구 역시 진양지 분포는 역사지진의 경우 수도권, 충남, 전북, 대구지역에서 높게 나타나며, 계기지진의 경우에는 황해도-충남 근해-경북내륙을 잇는 'L'자 형태의 집중도를 보인다고 하였다.

한반도의 지진분포가 'L'자형 분포를 보이는 원인은 명확하지 않다. 전명순 외(1993)는 한반도에 작용하는 응력과 단층선의 분포, 그리고 탁월하게 나타나는 선구조선의 분포를 통해 이러한 지진분포를 설명하고자 하였다. 이들은 한반도를 지배하는 지각운동은 N20°E 방향을 가지는 2조(租)의 단층대로 구성되어 있다고 보았다. 두 개의 단층대 중에서 서쪽은 원산-서울을 잇는 선을 따라서, 그리고 동쪽은 양산단층에서 약 50-60km 정도 떨어져 있는 쓰시마-고토 단층선(Tsushima-Goto Line)<sup>3)</sup>이 될 것으로 추정하였다. 여기에 덧붙여 한반도의 남부에서는 제3기 중신세(Mid Miocene) 이후까지 활동했던 것으로 판단되는 N60-70°W의 선구조가 우세하게 나타나고 있다. 따라서 한반도의 지진은 N20°E의 단층대를 따라서 주로 나타나고 있으며, 서산-포항을 잇는 선을 따른 지진대는 N60°W의 선구조선을 따라 발생한다고 설명하고 있다. 두 방향의 지진대가 서로 직교하는 'L'자 모양을 하는 까닭은 N20°E의 단층대가 계단형으로서 SSW쪽으로 단속적으로 연장되고, N60-70°W의 단층대는 한반도에 발달한 2조의 단층대중 서측의 것을 통과하지 못하여 나타나는 것으로 해석하였다. 하지만, 이러한 해석은 다음에 제시할 지구물리 및 측지학의 연구결과와는 상당부분 배치되고 있다.

전명순 외(1993)는 지진강도가 5.1보다 큰 8개 지진의 지진원요소(earthquake source mechanism)들을 분석하면서, 현재 한반도에 영향을 주는 주응력방향은 ENE-WSW 방향이 우세하다고 주장하고 있다. 이러한 응력장이 형성된 배경은 동쪽에서 유라시아판 밑으로 침강하는 태평양판과 남서쪽에서 충돌하는 인도판의 영향을 동시에 받는 결과로 해석하였다. 그 결과 한반도에 주향이동단층(strike-slip faulting)을 야기시켜, NE-SW 혹은 SE-NW 방향의 단층선을 만들고 있다고 보았다(전명순·전정수, 2000; 지현철, 2005). 최범영

외(2003a)는 지진원 메카니즘을 해석한 다양한 연구결과들은 종합하면서, 위와 유사한 결론을 내리고 있다.<sup>4)</sup> 여기에 덧붙여 GPS(Korean GPS network)<sup>5)</sup> 자료를 이용한 지각의 이동과 변형에 관한 연구들에서도 상기한 지진원 메카니즘의 해석과 유사한 결론을 내리고 있다(Hamdy *et al.*, 2005; Jin and Park, 2006; Jin *et al.*, 2006). Hamdy *et al.*(2005)는 2000-2004년 사이에 한반도 남부에 위치한 50개 지점에서 측정된 GPS 자료를 통해 한반도 남부지각의 평균이동속도는 1.5mm/년을 보이며, 전체적으로 시계반대방향으로 움직이고 있다고 주장하였다. 한반도 남부에서는 한반도에서는 ENE-WSW 방향의 압축력과 NNW-SSE방향의 인장력이 작용하고 있으며, 이러한 힘은 경기육괴·옥천분지와 영남육괴·태백산분지의 경계선을 따라서 좌수향 이동을 일으키고 있다고 보았다.

이상의 연구들을 종합할 경우, 한반도 지진의 분포와 그 분포의 형성 메카니즘을 해석하는 과정에서 몇 가지 불명확한 점들이 발견된다. 먼저 한반도의 지진 분포에 대해서는 연구자간에 의견일치를 보지 못하고 있는 듯하다. GPS를 이용한 지각변형 연구들은 공통적으로 경기육괴·옥천분지와 영남육괴·태백산분지의 경계선을 한반도 남부지방의 지진다발지역으로 상정하고 있다(예, Hamdy *et al.*, 2005). 하지만 전술한 바와 같이 한반도 남부지방에서는 지진의 대부분이 서산과 포항을 잇는 선을 따라 발달하고 있다는 의견이 지배적이다. 따라서 지진원 분석과 GPS를 통한 연구에서 공통적으로 주장되고 있는 ENE-WSW의 응력장이 어떠한 과정을 통해 N20°E와 N60-70°W의 방향성을 가지는 지진대로 전이되는지에 대한 설명이 제시되지 못하고 있다.

두 번째는 현재 이루어지고 있는 지진원 분석과 GPS 측정 결과는 수적으로 제한된 진앙자료와 GPS 측정지점으로 인해, 한반도 차원에서 관찰되는 주요한 응력(압축력과 신장력)의 평균적인 방향성만을 제시하는 수준에 머물고 있다. 기존 연구에서 제시된 GPS 측정 지점들의 상대적인 움직임을 살펴보면, 측정지점간에 이동방향과 이동량이 있어서 큰 차이를 보인다는 것을 쉽게 알 수 있다(Hamdy *et al.*, 2005; Jin and Park, 2006). 이러한 차이는 한반도내에는 지각구성물질의

차이와 지역적인 지각이동의 공간적인 차별성이 존재한다는 것을 의미한다. 하지만, 대부분의 연구들에서는 지각물질의 균질성에 근거하여 한반도(남부)의 전체적인 지반의 이동과 변형의 해석에 주력하고 있다. 이러한 문제점은 연구자들에 의해서도 보다 조밀한 측정망과 장기적인 관측결과로 추후 보완되어야 할 부분으로 지적되고 있다(Jin *et al.*, 2006).

### 3. 지진의 공간적인 분포특성

지진의 발생 메카니즘을 규명하기 위해서는 지진의 공간적인 분포에 대한 이해가 선행되어야 한다. 하지만 전술한 바와 같이, 한반도의 지진분포에 관해서는 선행연구들간에 이견이 존재하고 있기 때문에 지진분포에 대한 보다 정량적인 분석이 필요하다. 이 장에서는 공간통계기법들을 이용하여 한반도 지진의 분포특성을 분석하였다.

#### 1) 지진자료

기존의 문헌에는 다양한 역사<sup>6)</sup> 및 계기지진자료들이 사용되고 있으며, 지진자료가 가지고 있는 불확실성<sup>7)</sup>의 문제는 이미 많은 연구자들이 지적하고 있다(전명순, 1995; 이기화, 1998). 이 연구에서는 두 종류의 지진자료를 이용하였다. 첫 번째는 기상청에서 인터넷(<http://www.kma.go.kr>)을 통해 일반에게 공개하고 있는 자료이다. 이 자료에는 한반도의 지진관측망이 확충된 1978년부터 2005년까지 기록된 총 652회 지진의 규모와 진앙의 위치가 기록되어 있다. 또 다른 자료는 한국지질자원연구소에서 제공한 것으로 1913년부터 2006년까지 기록된 총 887회의 지진자료이다. 이 자료는 1905년과 1942년 사이의 지진은 전명순·전정수(2000), 1943년과 1977년 사이의 자료는 북한의 지진연구소, 그리고 1978년 이후는 기상청의 지진자료를 각각 이용한 것이다. 두 자료에서 기록된 지진은 상당 부분 중복되고 있지만, 지진의 분포에 관해서는 논란의 여지가 있기 때문에 동시에 분석하였다. 이 연구에 사용된 자료는 기계를 사용하여 측정한 자료이기 때문

에 정확성이 상대적으로 높은 것으로 판단된다.

## 2) 공간분석기법

지진의 공간적인 분포특성을 두 가지 측면에서 분석하였다. 먼저 지진의 강도가 일정한 공간적인 경향성을 보이는 지를 확인하기 위해 세미베리오그램 분석(semivariogram analysis)을 실시하였다. 두 번째로는 진앙의 공간적인 분포가 무작위로 나타나는지 아니면 밀집된 양상을 보이는 지를 파악하기 위해서 점패턴분석(point pattern analysis)을 이용하였다.<sup>8)</sup> 이 두 기법의 이론적 배경을 이 논문에서 사용될 개념을 중심으로 간략하게 살펴보면 아래와 같다.

### (1) 세미베리오그램 분석(Semivariogram Analysis)

세미베리오그램 분석의 목적은 측정 변수들의 공간적인 상관성을 파악하여 공간자료의 분포에 관한 최적함수를 제시하는 것이다(Journel and Huijbregts, 1978). 지진자료를 세미베리오그램을 이용하여 분석할 경우, 지진의 규모가 특정지역에서 높게 나타나는지 그리고 그 지점을 중심으로 일정한 경향성을 가지는 지를 파악할 수 있다. 지리적 사상들의 공간적인 유사성은 거리가 증가함에 따라 감소한다는 Tobler의 제 1 법칙에 근거하여, 한 지점에서의 기대치는 다음의 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.

$$\gamma(b) = 1/2 E[(z(x)-z(x+b))^2] \quad (1)$$

이 식에서 일정한 거리 ( $b$ ) 사이의 반분산(semivariance) 값은 두 지점 간의 차이에 의한 분산을 반분한 것이다. 여기서  $b$ 는 분리거리(lag distance)라고 명명된다. 반분산의 통계적 유의성을 확보하기 위해서는 많은 지점들의 계측치가 필요하며, 일반적으로는 다음의 식에 의해 반분산을 구하게 된다.

$$\gamma(b) = 1/2n \sum_{i=1}^n ((z(x_i)-z(x_i+b))^2) \quad (2)$$

이 식에서  $n$ 은 정해진 분리거리( $b$ ) 내에 있으면서

반분산을 구하는 데 사용된 개체들의 조합의 총수를 의미한다. 거리에 따른 반분산의 변화를 파악하기 위해 분리거리  $b$ 를 순차적으로 증가시키면서 반분산의 변화를 도화한 것이 세미베리오그램이다.

세미베리오그램의 일반적인 형태는 거리함수  $b$ 가 짧은 경우에는 0에 가까운 값을 가지지만 거리함수의 증가와 더불어 반분산은 증가하게 된다. 하지만 특정한 분리거리에 도달하면 반분산이 더 이상 증가하지 않고 일정한 값을 유지하게 된다. 이렇게 반분산이 더 이상 증가하지 않으면, 이 거리 이상에서는 측정된 값들간에 공간적인 상관관계가 더 이상 존재하지 않는다는 것을 의미한다. 여기서 반분산이 일정해지는 거리를 상관거리(range), 그때의 반분산값을 문턱값(sill,  $c$ )이라고 명명한다. 일반적으로 거리함수  $b$ 가 0인 경우 반분산의 값은 0이어야 하나, 자료의 측정과정에서 나타나는 오차(measurement error)나 최소의 분리거리 이하에서 존재하는 미분산(microvariance)으로 인해 0 이상의 값을 가지는 경우가 많다. 이 값을 너겟값(nugget,  $c_0$ )이라고 한다.

구해진 세미베리오그램의 거리에 따른 분포는 다양한 함수로 표현되게 된다. 일반적으로 사용되는 함수로는 구면함수(spherical model), 지수함수(exponential model), 가우스함수(Gaussian model), 혹은 선형함수(linear model) 등이 있다. 이러한 함수들을 통해 상기한 세미베리오그램의 각종 지표들(문턱값, 상관거리, 너겟값)을 추출할 수 있다. 다음은 구면함수에 의한 세미베리오그램 모델의 예이다.

$$\begin{aligned} \gamma(b) &= c_0 + (c-c_0) \{3b/2a - 1/2(b/a)^3\} & 0 < b < a \text{인 경우} \\ \gamma(b) &= c_0 + (c-c_0) & b \geq a \text{인 경우} \end{aligned} \quad (3)$$

### (2) 점패턴분석(Point Pattern Analysis)

지진이 공간상에서 무작위적으로 나타나는지, 아니면 특정한 지점에 밀집되어 나타나는 지는 지진발생의 원인을 규명하기 위해서 반드시 필요한 작업이다. 지진과 같은 공간현상의 밀집도를 분석하는 방법은 다양하지만, 보편적으로 사용되는 기법은  $Khat$ 과  $Lhat$ 이다 (Bailey and Gatrell, 1995).

*Kbat* 기법의 원리는 단순하다. 즉 점사상이 나타나는 공간에서 일정한 거리이내에 나타나는 점사상의 수를 표시하는 것이다. *Kbat*은 식(4)와 같이 표현될 수 있다.

$$Kbat(b) = 1/\lambda^2 R \sum_{i \neq j} (I_b(d_{ij})/w_{ij}) \quad (4)$$

여기서 *b*는 분리거리,  $\lambda$ 는 분리거리를 반지름으로 그려지는 원내에서 나타나는 점사상수의 평균이며, *R*은 연구지역의 면적이다.  $d_{ij}$ 는 *i*번째와 *j*번째의 점사상간의 거리,  $I_b(d_{ij})$ 는 지시함수로  $d_{ij}$ 가 *b*보다 작거나 같은 경우에는 1, 그렇지 않은 경우에는 0의 값을 가진다.  $w_{ij}$ 는 *Kbat*을 계산하는 분리거리 *b*로 표시되는 계산영역이 연구지역내에 포함되는 비율을 표시하는 것이다. 이것은 계산과정에서 나타나는 '경계효과(edge effect)'를 보완하기 위해 사용되는 변수이다. 따라서 *Kbat*은 분리거리 *b*를 점차적으로 증가시켜 가면서 만들어지는

원내에서 나타나는 점사상의 수를 평균한 값이 된다.

*Kbat*은 거리가 증가하면서 점사상의 수가 누적되는 결과를 가져오기 때문에, 어느 거리에서 가장 공간적인 밀집도가 높은 지를 파악하기 어렵다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 *Kbat*을 변형한 *Lbat*이 사용된다 (Bailey and Gatrell, 1995). *Lbat*(*b*)는  $Kbat - \pi b^2$ 으로 표시된다. 여기서  $\pi b^2$ 는 공간적인 의존성이 없는 상황에서 균일한 분포를 보일 때 예상되는 *Kbat* 값이다. 따라서 *Lbat*이 0보다 클 경우에는 공간적으로 밀집된 것으로, 반대로 0보다 작을 경우에는 분산된 분포를 보이는 것이다.

이 연구에서는 *Lbat* 분석과정에서는 이봉분포(bimodal) 함수를 이용한 모의범위(simulation envelope)를 동시에 표현하였다. 모의범위란 지진의 분포가 공간상으로 '완전한 무작위성(complete spatial randomness)'을 보인다는 전제하에서 나타날 수 있는 *Lbat*값의 범위를 표시한 것이다. 모의범위보다 큰

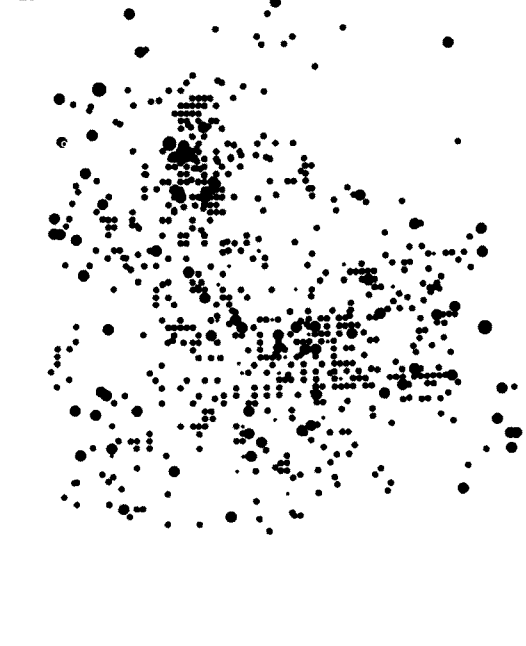
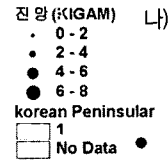
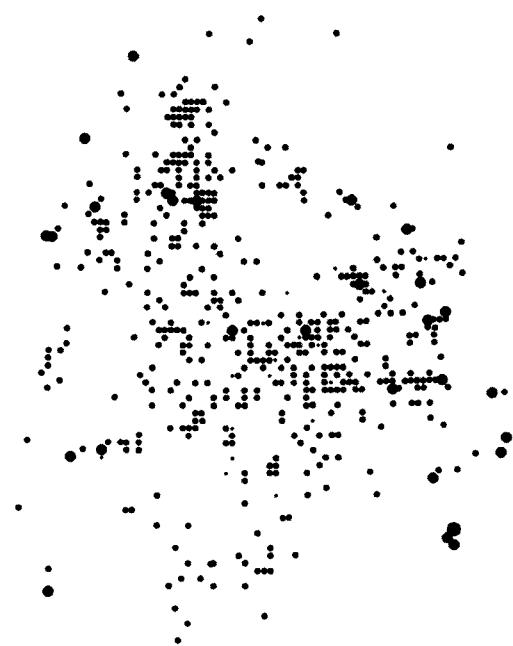
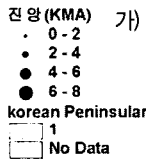


그림 1. 지진의 공간적인 분포. 가) 기상청 자료(KMA, n = 652), 나) 지질자원연구소 자료(KIGAM, n = 887)

Lhat값은 통계적으로 정해진 유의수준에서 지진분포가 밀집되어 있다는 것을 의미한다. 지진발생지의 분포를 가시적으로 표현하기 위해서는 커널밀도함수(Kernel density function)를 사용하였다.

### 3) 지진발생의 공간적인 분포특성

그림 1은 한반도에서 발생한 지진의 발생지점과 규모를 동시에 표현한 것이다. 한반도의 지진은 북부지방과 북동부의 산지지역을 제외한 지역에서 광범위하게 나타나고 있다. 지진활동이 낮은 지역은 대부분 산악지역으로 정확한 지진 감지가 어렵다는 현실적 한계도 있다. 하지만, 이 지역의 지반이 상대적으로 안정되어 있다는 사실에서 낮은 지진발생의 원인을 찾을 수도 있다. 한반도 북동부는 중생대에 발생한 송림변동, 대보변동 및 불국사변동의 영향을 적게 받은 지역이며, 낮은 지진활동은 이러한 현상과 연관되어 있을 것으로 추정된다(이기화, 1998). 반면 한반도의 서부와 남부지방의 경우에는 그 분포가 매우 불규칙적이지만, 전체적으로 분포가 'L'자형 분포를 보인다는 것으로 쉽게 엿볼 수 있다.

#### (1) 지진규모의 공간적인 특성

세미베리오그램 분석결과는 그림 2이다.<sup>9)</sup> 이 연구에서 사용된 두 자료는 모두 높은 반분산값과 더불어, 분리거리가 증가하면서 반분산이 지속적으로 증가하는 경

향을 보인다. 기상청 자료의 경우에는 가우스(Gaussian)함수가, 그리고 한국지질자원연구소 자료의 경우에는 지수(Power)함수가 최적함수로 나타났다. 하지만, 분리 거리에 따른 반분산의 특성은 직선(linear)함수의 특성을 강하게 보이고 있다.

직선함수에 근접하는 세미베리오그램은 측정된 지진 규모들 간에 공간적인 의존성이 약하다는 것을 의미한다. 달리 표현하면, 한반도에서 발생하는 지진의 규모는 특정지역이 다른 지역에 비해 상대적으로 높거나, 주변지역에 비해 뚜렷한 중심을 형성하지 않는다는 것으로 해석될 수 있다.

세미베리오그램 분석 결과에서 또 한가지 주목되는 점은 높은 너겟값(nugget)값이다. 기상청 자료에서는 너겟값이 0.27, 그리고 한국지질자원연구소 자료의 경우에는 0.35 정도로 나타났으며, 이 값은 기상청 자료의 문턱값(sill) 0.21보다도 크다. 너겟값은 자료가 가진 측정오차와 인접한 지역에서 나타나는 미분산(micro-variance)에 의해 결정된다. 지진의 진앙을 정확하게 추정하는 것은 매우 힘들며, 지진자료에서는 상당한 측정오차가 존재하고 있다(지현철, 2005). 측정오차와 더불어 가까운 거리에서 관찰된 지진들의 규모가 큰 차이를 보일 경우 높은 너겟값을 보일 수 있다. 계산된 너겟값에서 측정오차와 미분산의 상대적인 영향을 분리하는 것은 어렵지만, 이 결과는 지진이 인접한 지역에서 발생하더라도 규모면에서는 큰 차이를 보일 수 있다는 사실을 지시해준다.

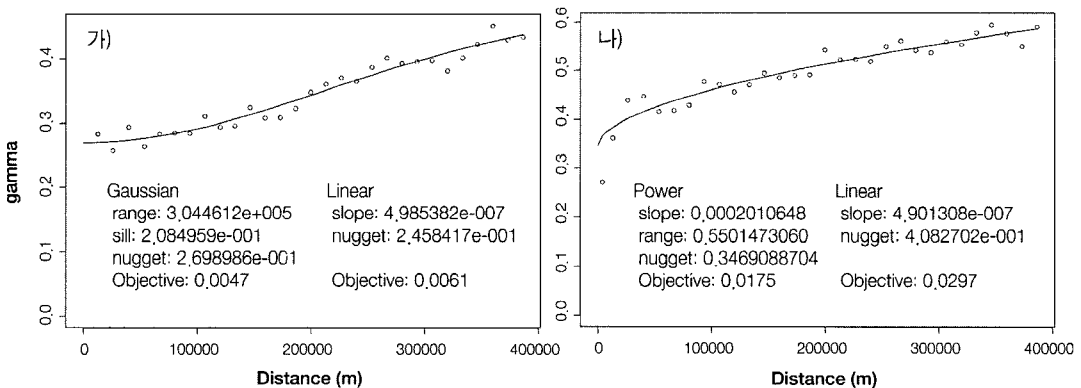


그림 2. 지진강도의 세미베리오그램 모델. 가) 기상청 자료(KMA, n=652), 나) 지질자원연구소 자료(KIGAM, n=887)



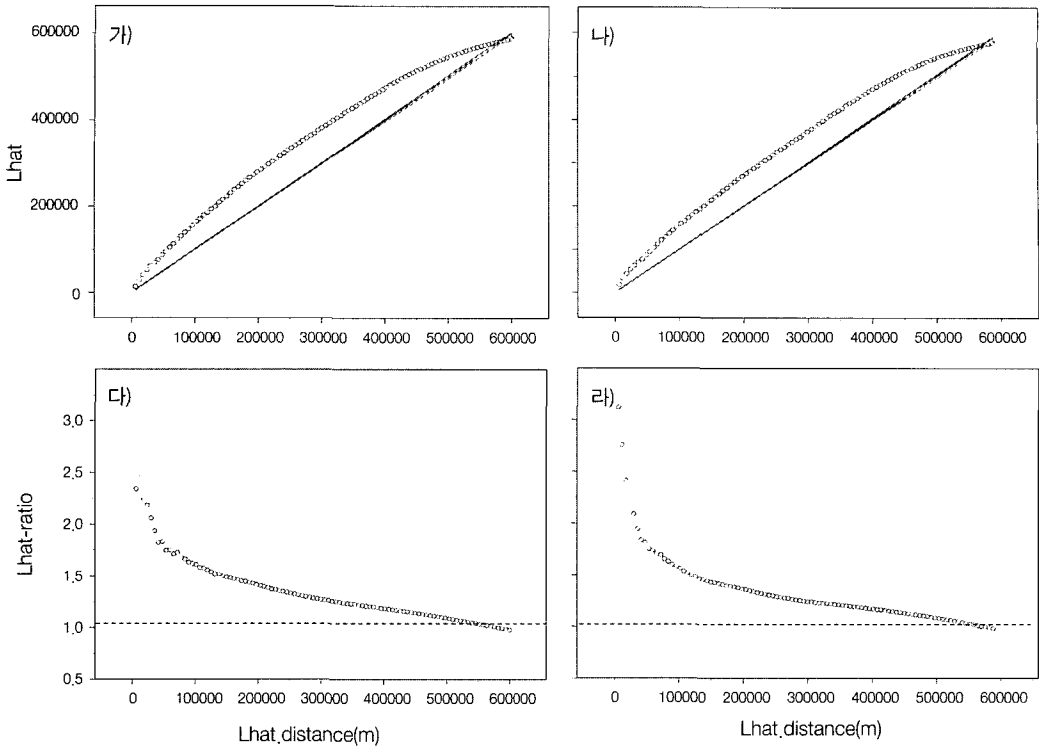


그림 3. 한반도 지진자료의 *Lhat* 분석결과와 각각의 *Lhat* 비율(실측치/예상치)의 감소특성

주: 가)와 다) 기상청 자료(KMA,  $n=652$ ), 나)와 라) 지질자원연구소 자료(KIGAM,  $n=887$ )

(2) 지진발생지역의 공간적인 특성

지진발생의 무작위성을 검증한 *Lbat* 결과는 그림 3이다. 두 자료 모두 유사한 특성을 보이고 있으며, 실제 계산된 *Lbat* 값은 대부분의 분리거리에서 통계적인 무작위성을 표현해주는 모의범위(simulation envelope)보다 훨씬 높게 나타나고 있다. 모의범위와의 차이는 분리거리 약 200-300km에서 최대가 되며, 이후에는 거리가 증가하면서 점차적으로 감소한다. 이 결과는 한반도의 지진은 무작위적으로 나타나는 것이 아니라, 측정된 공간범위에서 뚜렷한 밀집현상을 보이는 것으로 해석될 수 있다.

그림 4는 한반도의 지진밀도를 커널밀도함수를 이용하여 표현한 것이다. 커널밀도함수를 이용할 경우, 최종적으로 표현되는 밀도분포는 사용되는 커널폭(Kernel bandwidth)에 의해 큰 영향을 받는다. 이 연구에서는 *Lbat* 분석과정에서 계산되는 실측치와 예상치의 비율(*Lbat*-ratio)을 분리거리( $b$ ) 별로 표시한 뒤,

*Lbat*-ratio가 뚜렷한 변곡점을 보이는 50km와 100km를 커널폭으로 사용하였다(그림 3의 다)와 라). 그림 4에서 커널폭이 50km인 경우에는 밀도분포가 상대적으로 분산된 형태를 보이는 반면, 그 폭이 100km로 증가하면서 밀도분포가 보다 부드럽게 표현된다는 것을 알 수 있다.

커널폭이 50km(그림 4의 가)와 다))인 지진밀도에서는 몇 개의 지진다발지역이 관찰된다. 두 자료 모두에서 지진밀도가 높은 지역을 북쪽에서부터 남쪽으로 나열하면 평안남도 순천시, 황해북도 황주군, 강원도 정선군과 영월군, 경기도 서해안 지역, 충청남도 논산시, 경상북도 상주시, 경상북도 성주군, 경상북도 포항시와 경주시 등이다. 이러한 분포는 강원도 정선군과 영월군을 제외할 경우, 전명순 외(1993)와 김성균·백장선(2000)에서 지적한 바와 같이 대체적인 'I'자형의 분포를 보인다. 'I'자형 지진밀도 특성은 커널폭이 100km인 경우에 보다 명확해져, 평안남도 순천시에서

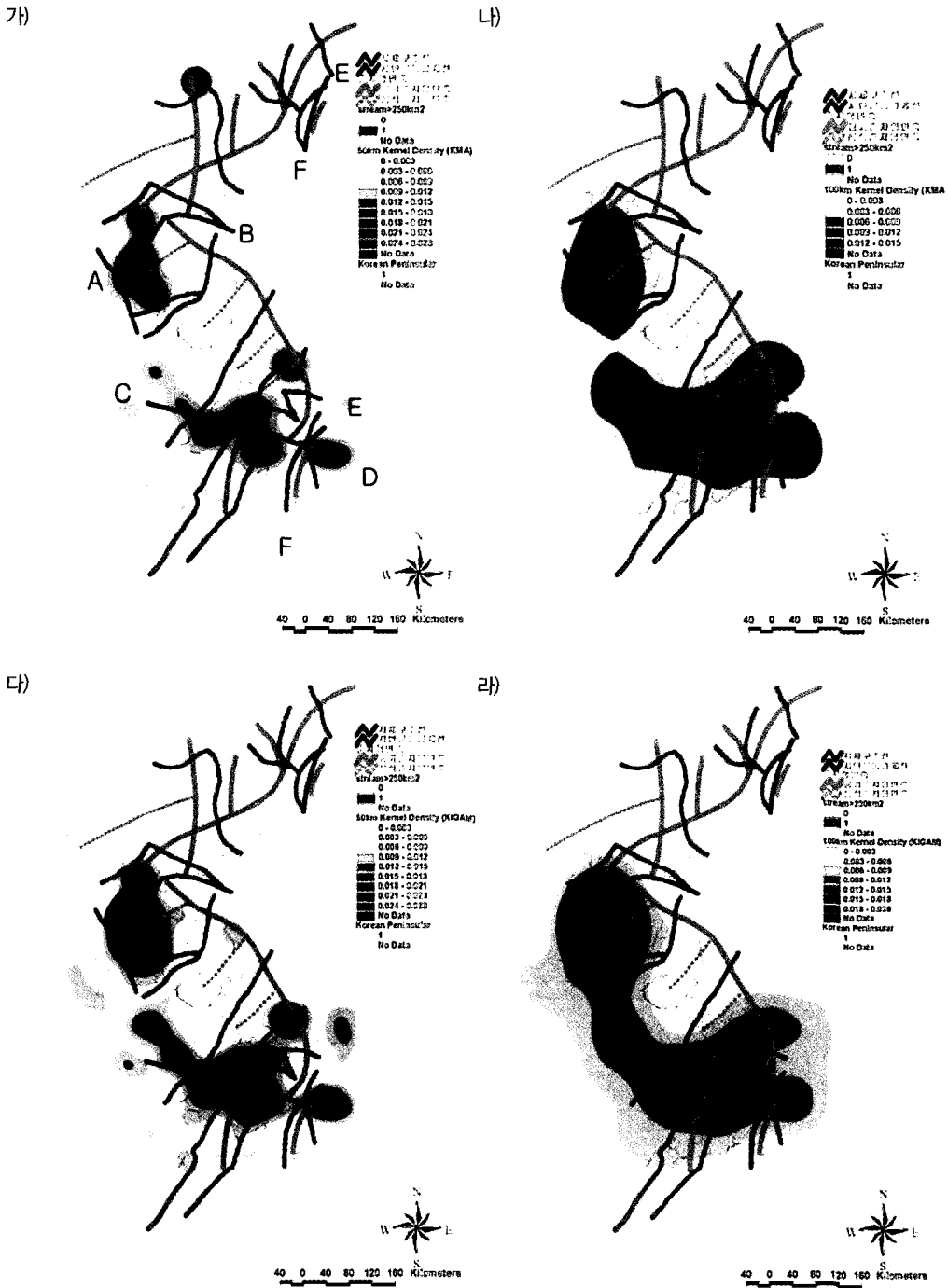


그림 4. 커널밀도함수를 이용한 지진밀도의 분포. 가) 기상청(KMA) 자료, 50km 커널; 나) 기상청(KMA) 자료, 100km 커널; 다) 지질자원연구소(KIGAM) 자료, 50km 커널; 라) 지질자원연구소(KIGAM), 100km 커널.

주. 푸른색 실선은 한반도 지체구조구의 경계, 검은색 실선은 지반운동구의 경계, 그리고 회색 실선은 준지형면축 축을 표현하고 있다. 지반운동구와 준지형면축들의 명칭은 그림 5와 박수진(2007), 그리고 지체구조구의 명칭은 대한지질학회(1999)를 각각 참조.

충청남도 서산, 그리고 다시 경상북도 포항을 잇는 선을 따라 지진이 밀집되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 패턴에서 예외적인 지역으로 자강도 중강군과 강원도 정선군과 영월군이 높은 지진밀도를 보인다.

#### 4. 지반운동의 공간적인 분포와 지진발생

기존의 연구들에서는 주요단층선 혹은 지체구조구의 경계선을 지진의 주요한 발생지점으로 가정하고 있다(2절 참조). 지진분포특성을 요약하면 한반도의 지진 분포는 규모면에서는 뚜렷한 경향성을 발견하기 어렵지만, 지진발생지점들은 공간적으로 밀집된 형태를 보이고 있다. 특히 주목되는 것은 지진밀도의 분포가 한반도의 지체구조구 혹은 주요 단층선 분포와는 분명한 차이를 보인다는 점이다. 이 절에서는 지진밀집지역이 발생하는 원인을 살펴보기 위해서, 지진분포가 지반운

동구와 지체구조구, 그리고 주요단층선과 가지는 상관관계를 비교·검토하였다.

#### 1) 지반운동구와 지진다발지역의 상관성

박수진(2007)은 수치고도모델의 분석을 통해 지표사박의 영향을 최소화한 상태에서 지반운동의 공간적인 특성을 반영하는 준지형면들을 추출하였다. 관찰된 준지형면들을 서로 연결하면 융기축을 지시해주는 융기 준지형면축과 융기축에서 거리가 증가하면서 준지형면이 계단상으로 배열되는 침식준지형면축을 파악할 수 있다.

한반도 전체에는 모두 13개의 준지형면축이 관찰되었다(그림 5 가) 참조). 준지형면축과 준지형면의 공간적인 분포는 한반도 지형의 특성을 결정하는 지반운동 특성이 크게 네 지역으로 나뉜다는 사실을 보여주고 있다. 박수진(2007)은 지반운동의 방향성과 공간적 범

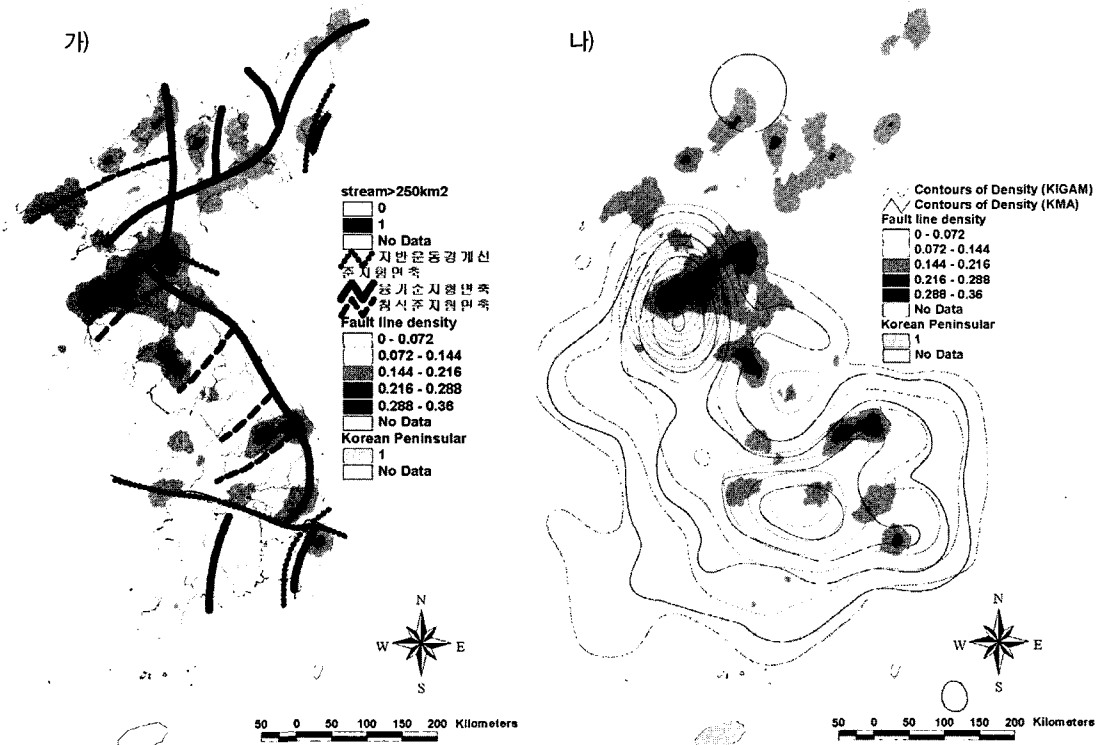


그림 5. 한반도의 주요단층선의 밀도분포와 지반운동구의 상관관계(가), 지진밀도분포와 지진발생의 밀도분포의 중첩결과(나)

위, 그리고 용기량에서 차이를 보이는 지역들을 지반운동구(geostructural region)라고 정의하고, 각각을 북부지반운동구, 중부지반운동구, 남부지반운동구, 그리고 동해안지반운동구로 명명하였다. 그림 4의 가)에 표현된 A-B, C-D, E-F 선은 각 지반운동구의 경계선을 나타낸 것이다.

북부지반운동구는 낭림준지형면축, 함경준지형면축, 그리고 마천령준지형면축으로 둘러싸인 개마고원을 중심으로 지역적인 용기를 경험하였으며, 서쪽과 동쪽으로는 점진적인 용기량의 감소현상을 보인다. 남쪽으로는 용기량이 동서방향보다는 상대적으로 높게 나타나면서, 중부지반운동구와 경계를 이루고 있다. 중부지반운동구는 동해에 면한 태백산준지형면축을 따라 높은 용기량을 보이며, NW-SE 방향으로는 용기량이 점차적으로 감소한다. 그 결과, 전체적인 용기량의 분포가 부채꼴의 형태를 보여준다. 남부지반운동구는 충남 서산과 경북 포항을 잇는 선 이남의 지역이다. 이 지역의 증앙을 관통하는 덕유산-지리산을 중심으로 서측보다는 동측의 용기량이 상대적으로 높은 비대칭적 지반운동의 특성을 보여준다. 한반도 남동부 해안 지역과 길주 명천지구대를 중심으로 한 지역을 중심으로는 비교적 최근까지 활발한 지반운동을 보이는 동해안지반운동구가 존재하고 있다.

그림 5는 준지형면축과 지반운동구의 경계선, 그리고 지진밀도를 중첩시킨 것이다. 이 그림에서 진앙이 밀집된 지역은 지반운동구의 경계부와 상당부분 일치한다는 것을 쉽게 알 수 있다. 한반도에서 지진발생의 빈도가 가장 높은 곳은 충청북도 옥천군과 경상북도 상주시를 중심으로 한 서산과 포항을 잇는 남부내륙 지역과 황해북도 황주군과 연탄군을 중심으로 한 지역이다. 남부지방의 서산과 포항을 잇는 지진밀집대는 덕유산-지리산을 잇는 지형면축과 양산단층을 따른 지형면축이 그 북쪽의 태백산준지형면축과 소백산준지형면축과 서로 어긋나는 선을 따라 놓여 있다. 특히 가장 높은 지진밀도를 보이는 옥천군과 상주시는 소백산준지형면축과 덕유산-지리산준지형면축이 서로 어긋나는 지역과 일치하고 있다.

황해북도 황주군과 연탄군을 중심으로 한 지진밀집 지역은 중부와 북부지반운동구 경계선의 서쪽부에 해

당한다. 이 지역에서는 남부지반운동구와 중부지반운동구의 경계선에서와는 달리, 지진의 밀집도가 지반운동구의 경계부와 선적인 연결성이 비교적 약하게 나타나고 있다. 즉, 낭림준지형면축과 태백산준지형면축이 어긋나는 함경북도 요덕군 보다는 그 서쪽지역에서 보다 높은 지진밀도가 나타나고 있다. 이러한 차이가 나타나는 원인은 태백산준지형면축과 그 북부의 낭림준지형면축이 유사한 방향성을 가지고 용기되고 있는 반면, 이 두 용기축에서 거리가 멀어지면서 용기량의 차이가 증가하여 발생하는 현상으로 추정된다. 특히 지진발생밀도가 높은 지역은 멸약준지형면축과 거의 평행하게 달리고 있어, 이러한 해석의 가능성을 높여주고 있다.

동해에서의 진앙분포는 양산단층의 북동연장선상 혹은 평행하게 진앙들이 배열되어 있는 형태를 보인다(전명순, 1995). 지진의 밀도분포(그림 4)에서는 강원도 삼척시를 중심으로 한 영월군과 평창군, 그리고 경북 포항 및 경주시를 중심으로 높은 지진밀도가 나타나고 있다. 경북 포항과 경주시는 남부지반운동구와 동해안지반운동구가 교차하는 지점이라는 점에 유념할 필요가 있다. 강원도 삼척시와 영월군, 그리고 평창군을 중심으로 한 지진다발지점은 지반운동구의 경계선과는 어느 정도 거리를 두고 있다. 하지만 이 지점이 태백산준지형면축에서 용기량이 상대적으로 높은 지점으로 남동방향으로는 소백산축이 분기되고 있으며, 남쪽으로는 용기량이 급격하게 감소하는 지형적인 특성을 보이고 있다(박수진, 2007). 한반도 남동부 지역은 매우 복잡한 지구조적 특성을 보이며, 최근까지도 응력방향이 활발하게 변화되어온 지역으로 알려지고 있다(최범영 외, 2003a). 이 지역의 이러한 지구구조적 특징이 어떠한 과정을 거쳐 지형학적 특징으로 나타나는 지에 대해서는 보다 체계적인 연구가 필요하다.

## 2) 지체구조와 지진발생밀도의 상관성

그림 4는 지진밀도분포를 한반도 지체구조의 분포와 중첩시켜 표현하였다. 한반도 북부지역에서 특징적인 점은 지진발생밀도가 높은 평양과 황해북도 지역은 그 대부분이 평남분지 내에 속한다는 것이다. 반면,

평남분지 이북지역의 경우에는, 지진기록자체가 신빙성을 갖기가 어렵기는 하지만, 지진밀도와 지체구조구와는 어떠한 관련성도 찾기가 어렵다.

한반도 남부지역에서는 옥천습곡대가 그 남쪽의 영남육괴와 태백산 분지와 접하는 부분에서 다수의 지진밀집지역이 나타나고 있다. 한반도 남동부의 연일분지의 경우에는 많은 지진이 관찰되어, 지체구조구와 지진발생간의 관계를 나름대로 유추해볼 수 있는 지역이다. 강원도 영월군과 삼척군, 경상북도 상주시, 충청남도 논산시 등의 지진밀집대는 옥천습곡대내에 위치하며, 그리고 경상북도 상주시와 성주군의 경우에는 영남육괴와 태백산분지의 지체구조 경계선이 지나는 지역이다. 하지만, 한반도 남부지방에서는 지체구조구의 경계선은 NE-SW방향을 보이는 반면, 지진분포는 대체적으로 NNW-SSE의 방향성을 보이는 지반운동의 경계선과 더 유사하게 나타난다(2절 참조). 남부지역에서 나타나는 지진다발지역의 전체적인 배열상태는 지체구조구의 경계부를 따라서 지진이 발생한다는 확신을 어렵게 만들고 있다.

### 3) 단층밀도와 지진밀도의 상관성

그림 5의 나)그림은 한반도에서 관찰되는 주요단층선의 밀도<sup>10)</sup>를 지반운동구의 경계선과 지진발생밀도와 중첩시켜 표현한 것이다. 한반도에서 단층선의 밀

도가 가장 높게 나타나는 지역은 평양시를 중심으로 한 평안남도과 함경남도 수동군과 요덕군이다. 이 지역은 지체구조구로는 평남분지내에 위치하고 있다. 이 지역의 단층선 분포는 NNE-SSW의 단층선과 NW-NS 방향의 주요단층선들이 격자 형태로 교차하고 있다(대한지질학회, 1999). 주목되는 점은 높은 단층밀도를 보이는 지점은 지반운동의 경계선인 A-B선과 거의 일치하고 있다는 것이다(그림 5 가)). 지진밀도는 평양시 인근의 평안남도에서 높게 나타나지만, 높은 단층밀도를 보이는 함경남도 요덕군 주변지역에서는 지진밀도가 상대적으로 낮게 나타난다.

다음으로 단층선의 밀도가 높은 지점은 강원도 삼척시를 중심으로 영월군과 평창군을 잇는 지역이다. 이 지역에서 단층밀도가 가장 높은 지점은 태백산준지형면측에서 소백산준지형면측이 분기되는 지점과 일치하고 있으며, 높은 단층밀도는 차령준지형면측과 소백산준지형면측을 따라 서쪽으로 연결되고 있다. 경북 경주시 부근도 높은 단층밀도를 보이는 지역이다. 이 두 지역에서도 지진밀도가 상대적으로 높게 나타난다.

이와는 달리 단층밀도가 높지만, 지진밀도와와의 관련성이 명확하지 않은 지역도 여러 곳에서 관찰된다. 먼저 경기도 연천군을 중심으로 높은 단층밀도가 관찰된다. 광주준지형면측의 상단부에 해당하는 이 지역은 지진발생에서는 낮은 밀도를 보이고 있다. 마찬가지로 한반도 북부지방의 경우에서 비교적 높은 단층밀도를

표 1. 단층선 밀도와 지진밀도의 상관관계

	100km (KMA)	100km (KIGAM)	50km (KMA)	50km (KIGAM)	단층밀도	A	B	C
100km (KMA)	1.00							
100km (KIGAM)	0.92	1.00						
50km (KMA)	0.88	0.79	1.00					
50km (KIGAM)	0.79	0.89	0.82	1.00				
단층밀도	-0.04	0.11	0.02	0.17	1.00			
A	-0.49	-0.42	-0.45	-0.43	-0.13	1.00		
B	0.13	0.16	0.08	0.10	-0.13	-0.04	1.00	
C	-0.17	-0.06	-0.16	-0.03	0.01	0.07	-0.08	1.00

A: 지반운동구 경계에서의 거리(log<sub>10</sub>(m));  
 B: 준지형면측에서의 거리(log<sub>10</sub>(m));  
 C: 지체구조구 경계에서의 거리(log<sub>10</sub>(m));  
 유의수준: p < 0.01

보이는 지역이 있지만, 지진발생과의 상관성을 밝히는 어렵다. 반면에 높은 지진밀도를 보이면서도 단층 밀도가 상대적으로 낮은 곳은 서산에서 포항을 잇는 선이다. 이 지점은 한반도에서 가장 지진이 빈번하게 발생하는 지점이다. 하지만 단층선은 충청남도 공주시, 경상북도 상주시, 경상북도 의성군 등에서 부분적으로 높은 밀도를 보이지만, 지진밀도와 같은 선적인 발달을 보이지는 않고 있다.

#### 4) 지진밀도와 지반운동구, 지체구조구, 단층밀도 간의 통계적 상관관계

표 1은 지진밀도가 단층밀도, 지체구조구 경계에서의 거리( $\log_{10}(m)$ , C), 그리고 지반운동구 경계에서의 거리( $\log_{10}(m)$ , A)와 가지는 상관계수(Pearsons'  $r$ )를 구한 것이다.<sup>11)</sup> 서로 다른 지진자료와 커널을 이용하여 구한 지진밀도들간의 상관계수( $r$ )는 0.8-0.9 정도를 보여, 사용된 자료와 커널 크기의 차이가 이 연구의 결론에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

단층밀도와 지진밀도간의 상관계수는 -0.04에서 0.17 사이의 값을 보여, 한반도 규모에서 단층밀도가 지진밀도와 밀접한 관련성을 가진다고 보기는 어렵다. 또한, 지체구조구 경계에서의 거리와 지진밀도간의 상관계수는 -0.03에서 -0.16 정도를 보여주고 있다. 지체구조구의 경계로부터 거리가 멀어짐에 따라 지진밀도가 감소하는 경향을 관찰할 수 있지만, 한반도 차원에서 지진밀도와 지체구조구와의 관련성을 확인하기는 어려울 것으로 보인다. 지진밀도가 지반운동구 경계로부터의 거리(A)와 가지는 상관계수는 -0.4에서 -0.5 사이의 값을 보여주고 있다. 이 결과는 지체구조선과 단층밀도에 비해 지반운동구의 경계선이 지진의 발생을 설명하는데 보다 효과적으로 이용될 수 있다는 사실을 보여준다.<sup>12)</sup>

## 5. 토론

이 연구는 한반도 지반운동의 공간적인 차별성을 지진분포를 이용하여 검증하고, 이와 동시에 한반도 지

진밀집지역의 분포를 지반운동의 상대적인 차이라는 측면에서 해석하고자 하였다. 공간통계기법을 통해 밝혀진 한반도 지진의 분포특성은 3가지로 요약된다. 첫째, 한반도에서 수십년간 발생한 지진의 강도는 아주 약한 공간적인 의존성만을 보이고 있으며, 세미베리오 그래프 보여주는 높은 너켓값은 동일한 지역 내에서도 지진의 규모가 크게 달라질 수 있음을 지시해주고 있다. 둘째, 지진강도와는 달리 진앙의 분포 자체는 측정된 모든 스케일에서 뚜렷한 공간적 밀집현상을 보이고 있다. 셋째, 한반도에서의 지진다발지역은 독특한 모양('L' 자형)의 밀집현상을 보이고 있다.

지진발생이 지체구조구의 경계선 혹은 단층선과 관련성을 가질 것이라는 가설은 많은 선행연구들의 기본적인 전제조건이다. 하지만, 한반도에서 관찰되는 지진다발지역의 독특한 공간적 분포는 지체구조선 혹은 단층선과의 관련성만으로는 설명되기 어려운 것으로 보인다. 지진다발지역의 분포를 지체구조선과 단층선의 밀도, 그리고 지반운동구와의 통계적인 상관성을 분석한 결과, 지반운동구의 경계부에서의 거리가 다른 변수들에 비해 지진밀집현상을 보다 효과적으로 설명하는 것으로 밝혀졌다. 즉 현재 4개로 구성된 한반도의 지반운동구는 각각 서로 다른 이동방향과 지각변형특성을 보이고 있기 때문에, 그 경계부분에서 지각의 마찰파쇄현상으로 인해 지진이 밀집되어 나타난다는 해석이 가능할 것으로 보인다.

지진밀도와 지구조선(단층선, 지체구조선)간의 직접적인 인과관계를 상정하기 어렵게 만드는 일차적인 요인은 시간적인 스케일(temporal scale)의 문제일 것이다. 지체구조선은 오랜 기간 동안 중첩된 지질발달 및 지반운동의 결과이다. 한반도가 형성되는 과정에서 서로 다른 지구조운동들이 있었고, 그 결과 한반도에 지진을 발생시키는 응력의 방향성과 강도는 서로 달랐다는 것은 쉽게 유추해 볼 수 있다(최범영 외, 2002b). 따라서 장기간에 걸쳐 형성된 지체구조선으로 현재의 지진 분포를 설명하는 것에는 한계가 있을 수밖에 없다. 주요단층선 역시 오랜 지질시대를 거치면서 형성된 것이기 때문에, 현재 발생하는 지진다발지역을 설명하기에는 시간적인 스케일의 문제가 존재한다. 지형분석을 통해 추출된 지반운동구의 경계 역시 장기간 지속된

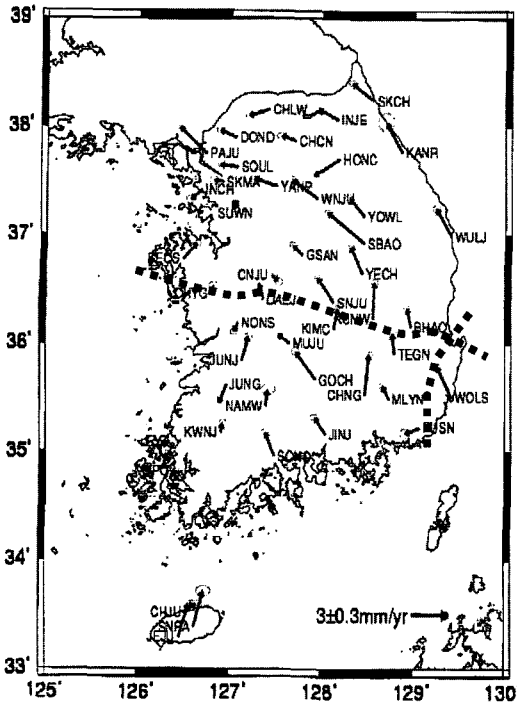


그림 6. GPS를 이용한 한반도 지각의 상대적인 이동량과 이동방향 추정결과 (Jin and Park(2006)의 Fig. 2를 저자가 수정).

주: 각 지점의 이동량과 방향은 수원(SUWN)을 중심으로 계산된 것이며, 검은 색 파선은 박수진(2007)에 의해 제기된 한반도 남부지방의 지반운동구들의 경계선을 표시하고 있다.

지형형성작용을 반영한 것이다. 따라서 지난 수십년간 실측된 지진자료를 완벽하게 설명하기에는 시간적인 스케일의 문제를 안고 있다. 하지만 지형특성이 지반운동과 동적인 평형관계를 유지하고 있다는 가정이 성립할 경우(박수진, 2007), 설정된 지반운동구는 현재의 지형을 형성한 지반의 상대적인 움직임을 보여줄 수 있는 증거가 될 것이다.

지진발생원인의 해석에서 시간적인 스케일의 문제를 최소화하면서도 지반운동의 특성을 직접적으로 파악할 수 있는 방법은 GPS를 통해 각 지점의 실질적인 움직임을 측정하는 것이다. GPS를 이용해 지각의 움직임을 측정하기 시작한 것은 극히 최근의 일이며, 측정망 역시 한반도의 남부지역에 국한되어 있다. 현재 축적된 자료로 한반도 전체의 지반운동을 정확하게 파악하기는 어렵지만, Jin and Park(2006)의 연구결과는

본 논문에서 주장하고 있는 지반운동의 지역적인 차이를 뒷받침해주는 결정적인 증거가 될 수 있을 것으로 판단된다.

그림 6은 2000-2003년 사이에 측정된 자료를 이용하여 GPS 측정지점의 상대적인 이동방향과 이동량을 표현한 것이다(Jin and Park(2006)의 그림 2를 수정). 각 GPS 측정지점의 이동형태는 복잡한 분포를 보이지만, 이 연구에서 주장하는 지반운동의 공간적인 차이를 상당부분 뒷받침해주고 있다. 먼저 중부지반운동구와 남부지반운동구에 위치한 GPS 측정지점들의 이동방향은 분명한 차이를 보이고 있다. 중부지반운동구의 경우에는 명확하게 동서 혹은 북서방향 지각이동이 관찰된다. 반면, 남부지반운동구의 경우에는 몇 곳에서 예외가 발견되기는 하지만 북북서 혹은 북북동방향의 지각이동이 탁월하게 나타난다. 그리고 중부와 남부의 지반운동구의 경계부분에서는 지각이동의 방향성이 북서에서 동서방향으로 서서히 변하는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 지반운동구들 간의 상대적인 이동의 차이는 동해안지반운동구에서도 관찰된다. 그림 6에서 동해안지반운동구에 속하는 GPS 측정지점은 부산(PUSN)과 월성(WOLS)이다. 이 두 지점이 보여주는 지각의 이동방향은 남동쪽 혹은 남서쪽이다. 이러한 이동특성은 남부지반운동구에 속한 지점들이 보여주는 북북동 혹은 북북서방향의 이동방향과는 확연하게 구분된다.

이상의 논의를 종합하면, 한반도 지진의 공간적인 밀집현상의 원인은 지반운동의 지역적인 차이에서 찾을 수 있을 것으로 보인다. 즉, 한반도를 구성하는 지반운동구가 서로 다른 이동방향과 이동량, 그리고 지반운동의 특성을 보임으로 인해 지반운동구의 경계부분에서 많은 지진이 발생하고 있다는 해석이 가능하다. GPS 측정지점의 이동방향은 주요 응력방향인 지반운동구별로 큰 차이를 보이는 것을 증명해주고 있다.

하지만 이러한 결론이 단층선과 지체구조선이 지진발생에 미치는 영향을 전적으로 부정하는 것은 아니라는 사실은 재차 강조할 필요가 있다. 한반도에 영향을 미치는 응력구조는 매우 복잡하며, 발생하는 대부분의 지진은 지하 10km 이내에서 발생하고 있다(지현철, 2005). 따라서 단일한 지진발생 메커니즘을 통해 한반

도의 지진발생을 모두 설명하기는 어려울 것이다. 그 상대적인 중요도 및 인과관계에 대해서는 향후 보다 체계적인 연구가 필요하다.

## 6. 결론

이 연구는 지진의 공간적인 분포를 통해 한반도 지반운동의 공간적인 차별성을 검증하는 것이 목적이다. 한반도의 지진분포에 관해서는 기존 연구들에서 상당한 이견이 발견되고 있었으며, 지진다발지역의 해석에서도 의견 일치를 보지 못하고 있다. 한반도 지진은 규모면에서 뚜렷한 공간적인 특징을 관찰할 수 없었으며, 동일한 지역 내에서도 지진규모가 큰 차이를 보인다. 하지만, 진앙의 분포 자체는 공간상에서 명확한 밀집현상을 보이고 있다. 지진다발지역은 평양시를 중심으로 한 평안남도과 황해도 지역, 그리고 남한에서는 경기만, 서산, 포항을 잇는 선을 따라 전체적으로는 'L' 자형의 밀집현상을 보이고 있다.

한반도에서 지진의 밀집현상은 지반운동의 지역적인 차이를 통해 설명될 수 있을 것으로 판단된다. 지진 밀도를 단층선의 밀도, 지체구조구의 경계, 그리고 지반운동구의 경계와 비교한 결과, 지반운동구의 경계부분이 지진밀집지역을 보다 효과적으로 설명해 주는 것으로 나타났다. 즉, 한반도에서는 4개의 지반운동구가 존재하고 있으며, 각 지반운동구의 이동량과 이동방향, 그리고 지반의 변형특성의 차이로 의해 지진이 발생할 가능성이 높은 것으로 해석된다. 이 결과는 한반도에서 진행되고 있는 지반운동의 공간적인 차이를 입증하는 동시에 한반도의 지진다발지역과 그 형성 메카니즘을 새롭게 해석할 수 있는 가능성을 제시해주고 있다.

기존의 지진발생지역에 관한 연구가 지체구조구의 경계부분 혹은 단층선과의 연관성에 중점을 둔 반면, 이 연구에서는 지역적인 지반운동의 상대적인 차이에 더 중점을 두어 지진발생을 해석하였다. 지형학적 해석을 통한 한반도의 지반운동의 공간적 특징은 기존에 학계에서 알려졌던 내용과는 차이를 보이고 있어, 한국지형의 형태적 특성 및 지진의 발생특성을 설명하는

새로운 시각을 제시해 줄 수 있을 것으로 기대된다. 지역적인 지반운동의 차이를 야기하는 원인과 이것이 지진발생으로 이어지는 과정을 밝히기 위해서는 지구물리 및 측지자료, 그리고 지역적인 지형특성 등을 종합적으로 고려하는 연구가 이루어져야 할 것이다.

## 謝辭

지진자료와 단층선 분포 자료를 사용할 수 있도록 허락해주신 한국지질자원연구소(KIGAM)에 감사드립니다.

## 註

- 1) 침식면(지형면)이란, 내외적인 지형형성작용과 지질구조-암층간에 이루어진 평형상태의 지형을 지칭하며, 한반도에서는 적어도 백악기말까지는 이러한 평탄한 침식면이 다수 존재했었다고 주장된다. 불국사동의 화강암을 끊는 저기복 지형이 관찰되기 때문에 백악기 침식면이라고 부른다(김상호, 1977).
- 2) 김상호(1977)는 네오텍토닉을 신제3기 이래의 구조운동으로 지칭하였으며, 조화룡(1982)은 이 시기를 울리고세와 마이오세 사이에 해당한다고 기술하고 있다.
- 3) 이 단층선은 마이오세(Miocene) 말기 필리핀판의 섭입이 시작되면서 형성된 것으로 알려지고 있다. 동북동-서남서(ENE-WSW) 방향의 이 단층선을 따라 지각의 측면이동으로 인해 동해가 축소되기 시작한 것으로 보고 있다 (Itoh, Y., 1999, Late Cenozoic tectonics around the southern part of the Japan Sea and Kyushu, 1999 JAPT Geology and Exploration Symposium, Makuhari, Chiba, JAPON (26/05/1999)).
- 4) 이 연구에서는 한반도에서 발생하는 대부분의 지진은 주향 이동단층에 약간의 역단층(trust) 운동이 첨가된 형태로 결론을 지었다. 국지적으로는 동해의 북서부와 황해남부는 역단층(trust)운동, 그리고 황해도지역에서는 정단층(normal faulting)에 의해 지진이 발생하는 지역적인 차이도 지적하였다.
- 5) GPS 자료는 측정지점의 상대적인 이동량과 방향을 제공해 줌으로써 지각의 움직임을 직접적으로 보여줄 수 있는 도구가 된다. 한반도의 영구적인 GPS 측정지점(Korean GPS Network, KGN)은 2000년부터 전국 70개 지점에 설치되어 운영되고 있다(<http://gdc.kasi.re.kr>).



- 6) 한반도의 지진을 기계를 통해 계속하기 시작한 것은 1905년 부터였다. 이러한 기계에 의해 실측된 자료를 계기지진이라고 하며, 이전의 지진자료들을 '역사지진' 자료라고 한다(이기화, 1998). 역사지진자료들은 주로 '삼국사기', '고려사', '조선왕조실록', '일성록', '동국문헌비고' 등의 문헌에 기록된 자료들이며, 현재 1,800여회의 유감지진자료가 기록되어 있다.
- 7) 역사지진자료의 경우에는 인간의 감지능력, 인간의 거주지의 분포, 유감된 지진의 기록능력, 기록의 사실성 여부 등에서 많은 불확실성을 가지고 있다. 계기지진자료의 경우에도, 지진관측망의 분포와 관측기기의 밀도 및 정확성 등에 의해 정확한 진앙과 지진강도의 측정이 어렵다.
- 8) 세미베리오그램 분석과 점패턴분석은 S-Plus 6.0의 공간통계모듈(Spatial statistics module)을 이용하였다.
- 9) 세미베리오그램 분석 과정에서 방향에 따른 비등방성(anisotropy)을 측정하였다. 45-90° 사이에서 아주 약한 비등방성이 관찰되기는 하였지만, 모델화가 어렵다고 판단하여 세미베리오그램 모델구축과정에서는 고려하지는 않았다.
- 10) 한반도의 주요단층선은 한국지질자원연구소에서 구축된 1:1,000,000 지질도에 표현된 단층선을 수치화하여 표현한 것이다. 단층선의 밀도는 단위지역(km<sup>2</sup>)에 포함되어 있는 단층선의 길이(km)의 합계로 표시한 것이다. 이 연구에서 사용한 단위지역은 20×20km의 정방형격자이다. 밀도를 계산하는 과정에서 해안선을 따라서는 '경계효과(edge effect)'를 보정하지 않았다. 따라서 해안선을 따라 20km 이내 지역에서는 단층선의 밀도가 상대적으로 과소평가될 수 있음에 유의할 필요가 있다.
- 11) 구해진 상관계수는 한반도의 경계이내에서 무작위적으로 추출된 약 9,000지점을 대상으로 분석한 결과이다.
- 12) 한 가지 주목되는 점은 지진밀도와 준지형면축으로부터의 거리간의 상관관계는 0.16 이하로 낮지만, 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 가진다는 점이다. 이것은 높은 지진밀도가 태백산준지형면축이 소백산준지형면축으로 분기되는 지점, 태백산준지형면축과 양산준지형면축이 분리되는 지점, 그리고 소백준지형면축과 덕유산-지리산준지형면축과 분리되는 지점, 마지막으로 멸약준지형면축의 말단부에서 높게 나타나는 것과 관련이 있을 것으로 판단되며, 추후 보다 체계적인 연구가 필요한 부분이다.

文獻

경제복, 1993, "남한의 지진출현과 지형 및 선구조선의 대

비," *Journal of Korean Earth Science Society*, 14(4), 482-491.

김상호, 1977, "한국의 산맥론," 자연보존, 19, 1-4.

김성균·백장선, 2000, "한반도 지진발생의 무작위성에 대한 통계적 검정과 집중도 추정," *Journal of Korean Earth Science Society*, 21(2), 159-167.

김소구, 2000, 지진연구, 청문각, 서울.

김옥준, 1982, "총론," 한국의 지질과 광물자원, 김옥준교수 정년퇴임 기념논문집, 3-11.

대한지질학회, 1999, 한국의 지질, 시그마프레스, 서울.

박봉순, 1982, "한반도 지체구조의 특성," 한국의 지질과 광물자원, 김옥준교수 정년퇴임 기념논문집, 155-170.

박수진, 2007, "한반도의 지반운동 (I): DEM 분석을 통한 지반운동의 공간적 분포 규명," *대한지리학회지*, 42(3), 368-387.

박필호·안용원·박종욱·조정호·임형철, 2000, "GPS로 켜 한반도 주변의 지각운동속도," *지구물리*, 3(3), 153-160.

신영홍·박종욱·박필호, 2006, "한반도 남부 모호면의 변형 구조," *Journal of Korean Earth Science Society*, 27(6), 620-642.

양승영(역), 1996, 한반도 지질학의 초기연구사: 조선-일본 열도지대 지질구조논고, 경북대학교출판부, 대구 (立岩巖, 1976, 朝鮮-日本列島地帶地質構造論考: 朝鮮地質調査研究史, 東京大學出版會, 東京).

윤순옥·전제범·황상일, 2001, "조선시대 이래 한반도 지진발생의 시·공간적 특성," *대한지리학회지*, 36(2), 93-110.

이기화·김정기, 2000, "한반도 주요 지체구조구별 지진학적 특성," *지구물리*, 3(2), 91-98.

이기화, 1998, "한반도의 역사지진자료," *지구물리*, 1(1), 3-22.

장기홍, 1985, 한국지질론, 민음사, 서울.

전명순·전정수, 2000, 한반도 및 인근해역의 지진특성, 대한지질공학회 세미나자료.

전명순·최위찬·박근필, 1993, 한반도와 그 주변의 Neo-Tectonic에 관한 연구, 과학기술처, 87.

전명순, 1995, "지진의 원인과 그 대책," *계간 과학사상*, 가을호, 79-104.

조화룡, 1982, "지형," 한국지자-총론, 건설부 국립지리원, 160-165.

- 지현철, 2005, "신속한 지진피해평가시스템 구축," 국토, 285, 25-39.
- 최범영 · 전명순 · 전정수 · 류충렬 · 이병주 · 안기오, 2003a, "현생지구조 체제," 최범영 외(편), 한반도 지구조 진화연구-후기중생대 · 신생대 지구조 진화사(3), 한국지질자원연구소, 229-256.
- 최범영 · 전명순 · 전정수 · 류충렬 · 이병주 · 안기오, 2003b, "지구조 계통 토론 및 종합," 최범영 외(편), 한반도 지구조 진화연구-후기중생대 · 신생대 지구조 진화사(3), 한국지질자원연구소, 257-271.
- Bailey, T.C., and Gatrell, A.C., 1995, *Interactive Spatial Data Analysis*, Longman, Harlow, Essex.
- Burbank, D.W., and Anderson, R.S., 2001, *Tectonic Geomorphology*, Blackwell Science, Malden, Mass.
- Choi H.I. and Park, K.S., 1985, Cretaceous/Neogene stratigraphic transition and Post-Gyeongsang tectonic evolution along and off the south-east coast, *Korean Geological Society of Korea*, 21, 281-296.
- Chough, S.K., Kwon, S.T., Ree, J.H., and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean Peninsula: a review and new view, *Earth Science Reviews*, 52, 175-235.
- Hamdy, A.M., Park, P.H., and Lim, H.C., 2005, Horizontal deformation in South Korea from permanent GPS network data, 2000-2003, *Earth Planets Space*, 57, 77-82.
- Jin, S. and Park, P.H., 2006, Crustal Stress and strain energy density rates in South Korea deduced from GPS observation, *TAO*, 17(1), 167-178.
- Jin, S., Li, Z.C., and Park, P.H., 2006, Seismicity and GPS constraints on crustal deformation in the southern part of the Korean Peninsula, *Geoscience Journal*, 10(4), 491-497.
- Journel, A. G., and Huijbregts, C.J., 1978, *Mining Geostatistics*. Academic Press Inc., New York.
- Lee, K. and Jung, H.O., 1980, A study of instrumental earthquake data of the Korean Peninsular, *Journal of Geological Society of Korea*, 16, 32-45.
- Lee, K., Jeong, B.I., and Kim, K.H. 1986, Seismicity of the Korean Peninsular(Seismicity of Hongsung Area), *Journal of Geological Society of Korea*, 22, 164-175.
- 교신: 박수진, 151-746, 서울특별시 관악구 신림동 산 56-1, 서울대학교 사회과학대학 지리학과(catena@snu.ac.kr, 전화: 02-880-9007)
- \*Correspondence: Park, Soo Jin, Department of Geography, College of Social Sciences, Seoul National University, San 56-1, Silim-dong, Gwanak-gu, Seoul, 151-742(e-mail: catena@snu.ac.kr, phone: 02-880-9007)

최초투고일 07. 08. 01.

최종접수일 07. 09. 16.