

## 한반도 지진발생의 무작위성에 대한 통계적 검정과 집중도 추정

김성균<sup>1</sup> · 백장선<sup>2</sup>

<sup>1</sup>전남대학교 지구환경과학부 지질학과, 500-757 광주광역시 북구 용봉동 300

<sup>2</sup>전남대학교 통계학과, 500-757 광주광역시 북구 용봉동 300

### Statistical Testing of the Randomness and Estimation of the Degree of for the Concentration Earthquake Occurrence in the Korean Peninsula

Sung-Kyun Kim<sup>1</sup> · Jang-Sun Baek<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

<sup>2</sup>Department of Statistics, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

**Abstract:** We tested the randomness and estimated the degree of concentration for the earthquake occurrence in the Korean Peninsula by using the statistical methods for spatial data. For the randomness test, we applied both of the test statistics based method and the empirical distribution based method to the both of historical and instrumental seismicity data. It was found that the earthquake occurrences for historical and instrumental seismicity data are not random and clustered rather than scattered. A nonparametric density estimation method was used to estimate the concentration degree in the Peninsula. The earthquake occurrences show relatively high concentration on Seoul, Choongnam, Chonbook, and Kyungbook areas for the historical seismicity data. Also, "L" shaped concentrations connecting Whanghaedo –the coast of Choongnam–the inland of Kyungbook area are revealed for the instrumental seismicity data.

Key words: randomness, degree of concentration, seismicity data, nonparametric density estimation

요약: 본 연구에서는 한반도의 지진활동을 공간 통계학 방법을 이용하여 지진발생의 무작위성에 대한 검정과 집중도의 추정을 수행하였다. 무작위성에 대한 통계적 검정은 검정통계량을 이용한 방법과 경험분포를 이용한 두 가지 방법을 사용하였다. 역사지진과 계기지진의 두 대상자료에 대하여 적용한 결과, 두 자료 모두 무작위적이지 않고 군집적인 분포를 가지고 있는 것으로 판명되었다. 한편 비모수 밀도함수 추정방법을 이용한 진앙지 분포의 집중도는 역사지진의 경우 한반도 중부, 충남, 전북, 경북지역에서 높게 나타났다. 또한 계기지진의 경우에는 황해도-충남 해안-경북 내륙을 연결하는 "L"자 형태의 집중도를 보인다.

주요어: 무작위성, 집중도, 지진활동 자료, 비모수 밀도추정

## 서론

한반도의 지진활동에 관한 통계적 연구는 한국동력자원연구소(1983)에 의하여 수행된 이후 다수의 연구(예를 들면, Lee and Noh, 1988; Lee and Jin, 1989; Kyung, 1989; 김성균, 1997)가 뒤따라 이루어졌다. 이 연구들에서는 다양한 방법을 이용하여 한반도의 지진활동을 시공간 영역에서 분석하였다. 즉, 시간적인 지진활동의 변화로부터 지진활동이 활발한 시기 및 지진활동의 주기와 관련된 문제를 취급하였으며, 공간적으로 지진활동이 집중되는 지역을 추출하였다. 또한

지질구조선, 지형, 중력이상 등 지구물리학적 관측량의 분포와 진앙지 분포와의 관련성이 주요 연구대상이 되어왔다. 이러한 연구들은 지진이 공간내에서 무작위적으로 발생하지 않고 특정 지역에 집중된다는 가정을 잠재적으로 포함하고 있다. 이러한 가정은 지진의 발생원인을 고려할 때, 다음과 같은 관점에서 지극히 당연한 것으로 볼 수도 있다. 지진의 발생원인으로서 Reid에 의하여 제창된 탄성 반발설이 현재로서는 가장 유력하며, 이 가설에 의하면 지하에 응력이 축적되어 암석의 파괴강도보다 커지면, 파괴가 발생하게 되어 단층운동이 일어난다. 이러한 단층운동의 결

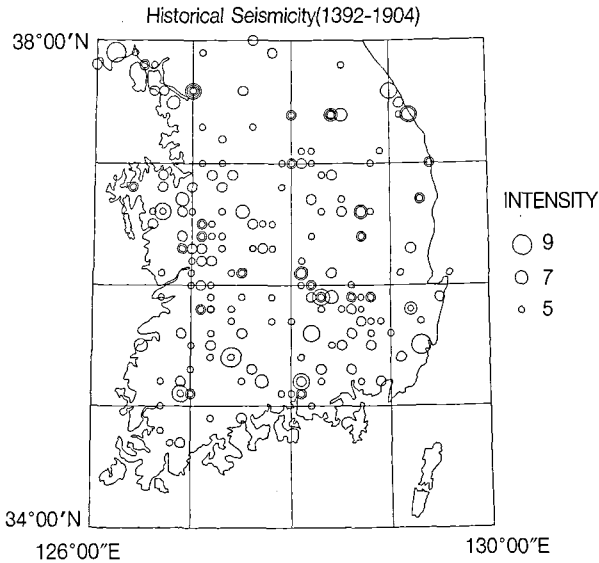


Fig. 1. Historical seismicity.

과가 바로 지진이라고 설명하고 있다. 따라서 단층을 비롯한 단층과 관련된 구조선들은 과거 지진의 흔적이라고 할 수 있다. 암석의 파괴실험이나 현재의 지진 활동의 양상을 고찰한 바에 의하면, 단층과 같은 구조적인 약선대에는 응력의 집중이 상대적으로 쉽게 일어나 지진발생이 용이하다는 것이 알려져 있다. 그러므로 지진이 공간상에서 무작위적으로 흩어져 발생하기 보다는 특정지역에 집중되어 발생하리라고 추론할 수 있다.

위와 같은 추론에도 불구하고 본 연구에서는 “한반도에서 발생한 지진의 진앙지 분포가 무작위적(random)인가? 또는 그렇지 않은가?”를 다른 지구과학적 정보가 없이 완전히 통계학적 기법만으로 규명하는데에 그 목적이 있으며, 만일 무작위적이지 않다면 어떤 곳에 집중되고 어떤 방향성이 있는가를 정량적으로 공간상에 나타내고자 한다.

## 지진자료

한반도의 지진자료는 약 2000여년에 걸친 역사지진 자료와 1905년 이후 계기관측에 의하여 얻어진 계기지진자료로 나눌 수 있다. 역사지진자료는 삼국시대의 초기부터 조선시대에 걸쳐, 여러 역사문헌속에 문장으로 기술되어 있다. 따라서 그 당시의 정치, 문화, 경제의

중심지 및 인구 밀집지역의 분포와 건축물 양식의 차에 따라 기록자체의 균질성과 통일성이 유지되기 어렵다. 또한 시대적으로 인구분포와 세력범위가 다른 여러 왕조의 관점이 다른 사기들에 의하여 기록된 것이므로 누락과 과장, 오기의 가능성을 배제하기 어렵다(김성균, 1997). 그 예로서 삼국-고려시대의 지진기록은 대부분 감진지역이 누락되어 있으며, 기간에 비하여 수록된 지진의 수가 조선시대에 비하여 상대적으로 적다. 물론 이러한 사실은 지진활동의 차로서도 해석할 수 있으나, 고대로 갈수록 작은 규모 지진의 누락 가능성을 인정하지 않을 수 없다. 진앙지의 분포가 전국적으로 나타나며, 감진기록이 비교적 상세하게 나타나는 시기는 조선시대부터이다. 그러므로 조선시대 이후의 지진기록은 어느 정도 신뢰할 수 있는 자료로 생각된다. 따라서 본 연구에서 진앙분포의 무작위성과 집중도를 분석하기 위하여 채택한 것은 조선시대 이후의 자료이다.

위에서 언급한 바와 같이, 역사기록은 진동현상과 재해에 대하여 서술적으로 기록하고 있으므로, 이러한 기록으로부터 진앙지, 진도 또는 규모를 결정하는 데에는 해석자의 주관이 개입되기 쉽다. 이러한 원인으로 현재 작성되어 있는 지진목록(예를 들면, 한국동력자원연구소, 1983)은 연구자와 기관에 따라 다르다. 본 연구에서 채택한 자료는 내진설계 기준연구를 위하여 작성된 지진목록(건설교통부, 1997)이다. 이 목록 중 조선시대 이후부터 계기관측 이전, 즉 1392년부터 1904년까지의 지진 중 MM진도 5 이상으로서 경도  $126^{\circ}-129.5^{\circ}$ , 위도  $34.5^{\circ}-38^{\circ}$  범위의 4각형 지역을 대상으로 한다. 이 지진들의 수는 268개이며, 그 분포를 Fig. 1에 나타낸다.

한반도에 근대적인 지진계가 설치되어 계기지진자료가 획득되기 시작한 것은 1905년부터이다. 한국동력자원연구소(1983)와 기상청(1992)으로부터 발췌한 계기지진목록을 조사해 보면, 당연한 사실이지만 지진관측망의 특성(즉, 지진관측소의 수, 지리적 분포 및 지진계의 성능)과 관측된 지진의 수가 서로 큰 상관성이 있음을 알 수 있다. 왜냐하면 관측소가 지리적으로 적절히 분포되어 있고 그 수가 많고 지진계의 성능이 좋을수록, 지진관측의 기회가 증가하기 때문이다. 본 연구에서는 자료의 균질성과 완전성을 가능한 한 확보하기 위하여 1978년 이후의 지진자료를 선택하였다. 여

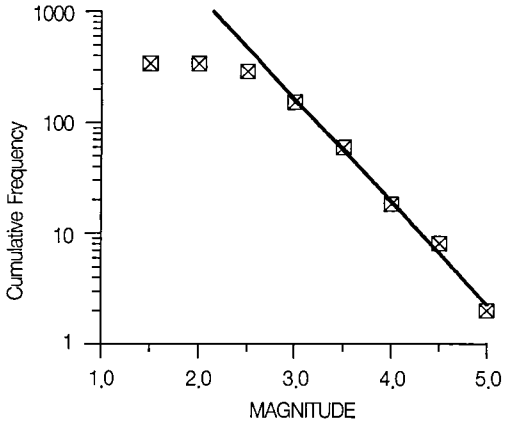


Fig. 2. Cumulative frequency-magnitude curve for the instrumental earthquake data.

기서 채택한 목록은 건설교통부(1997)이며, 이 목록은 기상청(1992)의 자료와 비공식적으로 입수한 북한지진 목록을 참조하여 작성한 것이다. 대상지역은 자료누락의 가능성을 배제하기 위하여 대체로 육상지역을 포함하는 경도 124°-130°, 위도 34°-40°의 4각형 지역이 선정되었다. Fig. 2에 지진규모와 누적빈도의 관계를 도시하였으며, 규모 3.0 이상의 지진에 대하여 규모-누적빈도의 관계가 직선을 보이며, b값은 0.784로 나타난다. 따라서 대략 규모 3.0 이상의 지진이 관측의 한계라고 볼 수 있다. 이를 참조하여 본 연구에서는 규모

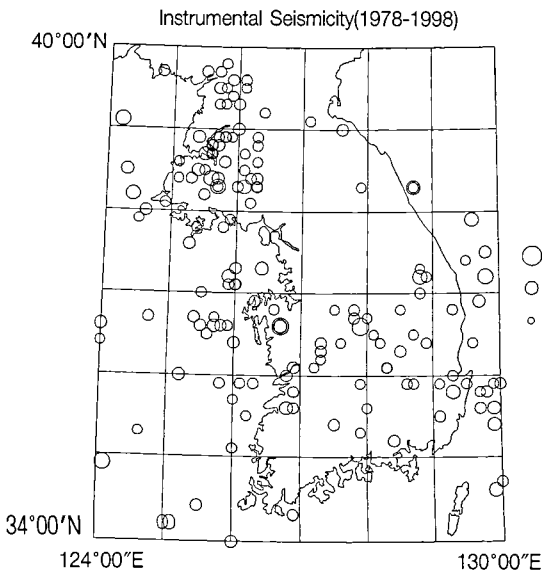


Fig. 3. Instrumental seismicity.

3.0 이상의 지진을 대상으로 하였으며, 진양분포를 Fig. 3에 나타낸다.

## 방법

### 진양지 분포의 무작위성에 대한 통계적 검정

일반적으로 공간통계학(spatial statistics)에서  $s \in R^d$ 를  $d$ 차원의 유클리드 공간의 자료위치이고, 공간위치  $s$ 에서의 관심확률변수를  $Z(s)$ 라 할 때,  $R^d$ 의 부분집합  $D$ 에 속해 있는  $s$ 에 대하여  $\{Z(s): s \in D\}$ 를 공간과정(spatial process)이라 한다. 특히,  $D$ 가  $R^d$ 내의 점과정(point process)이며 모든  $s \in D$ 에 대하여  $Z(s) = 1$ 이면, 위의 공간과정을 공간 점과정(spatial point process)이라 부른다. 이러한 공간 점과정은 발생사건의 위치들이 주요연구 대상일 때 주로 적용되는 모형이다. 이때, 우리의 주요 관심사는 발생사건들의 위치가 어떤 패턴을 취하고 있는가이다. 즉, 사건들이 관심공간상에서 무작위적으로 발생하는지, 혹은 군집적이거나 규칙적으로 발생하는지 밝혀보고자 하는 것이다.

우리는 진양지들이 공간 점과정을 따를 때 이러한 공간점들의 분포양상이 무작위적인지, 아닌지를 지진자료를 가지고 통계적으로 검정하고자 한다. 공간자료의 무작위성은 완전 공간무작위성(complete spatial randomness)을 말한다. 관심지역  $A$ 에 대하여  $N(A)$ 를  $A$  지역에서 발생한 사건(event)의 개수라 하고  $s_1, s_2, \dots, s_n$ 을 공간점 분포, 즉 진양지들이라 하면,  $B_1, B_2, \dots, B_n \subset A$ 에 대하여,

$$\Pr(s_1 \in B_1, s_2 \in B_2, \dots, s_n \in B_n | N(A) = n) = \prod_{i=1}^n (|B_i|/|A|) \quad (1)$$

이면 공간점 패턴들은 완전 공간무작위성을 갖는다고 정의한다. 이때,  $|B| = \int_B ds$ 이다. 직관적으로 말해서 사건(지진)들이 지역  $A$ 내의 어느 곳에서나 발생할 확률이 모두 같고 사건들끼리 상호작용이 없으면 지진 진양지 분포는 무작위적인 것이다.

완전공간 무작위성을 통계적으로 검정하는 방법은 크게 방형방법(quadrat methods)과 거리 기반방법(distance methods)의 두 가지로 나눌 수 있다. 방형방법은 관심지역  $A$ 를 방형(주로 직사각형모양)의 부분지역으로 분할하고, 그 방형에서 발생한 사건의 수와 완

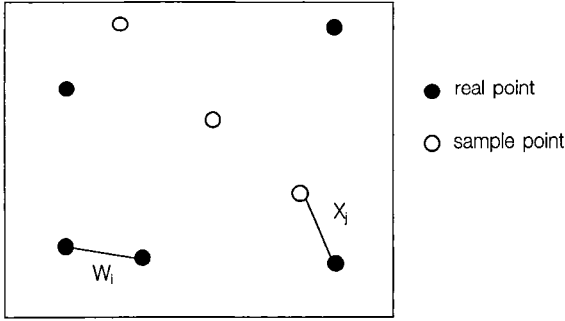


Fig. 4. The types of the nearest-neighbor distances.  $W_i$ : the distance between the  $i$ th event and the neighboring event,  $X_j$ : the distance between the  $j$ th sample point and the neighboring event.

전 공간무작위성하에서의 기대사건수와의 차이를 계산하여 그 차이가 유의적으로 작으면 무작위적이라고 판정한다(Cochran, 1954; Greig-Smith, 1952; Ludwig and Goodall, 1978). 그런데 이러한 방형방법은 방형의 크기를 어떻게 결정할 것인가 하는 문제점이 있으며, 거리 기반방법에 비하여 공간적 정보의 손실이 더 크다. 거리 기반방법은 사건 발생위치에 대한 정보를 더욱 정확하게 활용할 수 있으며 방형방법에서와 같이 방형의 크기를 결정하지 않아도 되는 이점이 있다. 거리 기반방법으로서 우리가 사용할 방법은 최근접 이웃방법(nearest-neighbor method)이다.

사건과 최근접 이웃 사건과의 거리를  $W$ 라 하고, 표본점과 최근접 이웃 사건과의 거리를  $X$ 라 하자(Fig. 4). 이때 표본점들은 연구대상지역에서 무작위적으로 선택된다. 이러한 최근접 이웃거리에 기반한 검정이론은 각 거리들간의 독립성을 가정한 것이다. 만약 관심지역  $A$ 에서 실제자료나 표본점들이 매우 많이 선택되면 독립성을 보장할 수 없다. 따라서 검정을 위한 실제 자료점과 표본점의 추출 개수는  $m \leq N(A) / 10$ 을 만족하는 최대정수로 선택하였다. 이렇게 정의된 거리들에 기반을 둔 무작위성을 검정하기 위한 통계적 검정통계량들은 여러 가지가 있으나(Cressie, 1991), 그중에서 다른 방법들에 비하여 검정력이 높은 방법으로는,  $\lambda$ 를 집중도라 할 때 검정통계량들은 다음 식으로 주어진다(Pielou, 1959; Hopkins, 1954).

$$T_1 = \pi \lambda \sum X_i^2 / m \tag{2}$$

$$T_2 = \sum X_i^2 / \sum W_i^2 \tag{3}$$

완전 공간무작위성하에서  $T_1$ 은 점근적으로  $N(1, 1/m)$  분포를, 그리고  $T_2$ 는 정확히  $F_{2m, 2m}$ 분포를 따르므로 주어진 자료를 사용한 검정 통계량값으로부터 유의확률( $p$ -값)을 계산하여, 유의확률이 주어진 유의수준보다 작으면 완전공간 무작위성을 기각하게 된다. 참고로  $T_1$  분포는  $m \geq 10$  이면  $N(1, 1/m)$  분포로 잘 근사된다(Diggle et al., 1976.)

### 지진발생 집중도 추정과 방향성 탐색

연구대상 전체 지역  $A$ 를  $a \times a$  면적을 갖는 정방형의 부분지역으로 분할하여 부분지역내에서 발생한 지진의 수를 살펴보면 단위면적당 발생 지진수가 어느부분지역에서 많고 적은지 조망해 볼 수 있다. 공간점과정의 체계에서 살펴보면 이러한 단위면적당 사건의 발생수는 집중도함수(intensity function)를 추정하게 된다.  $N(s, a)$ 를 발생위치  $s$ 에서  $a \times a$  정방지역에서 발생한 발생사건의 수라 하자.

$$\lambda_a(s) = \Pr(N(s, a) > 0) / a^2 \tag{4}$$

라고 할 때, 만약 모든  $s \in A$ 에 대하여  $a \rightarrow 0$ 에 따라  $\lambda(s) \rightarrow \lambda(s)$ 이  $\{\lambda(s): s \in A\}$ 를 집중도함수라 한다. 그러면  $N(s, a) / a^2$ 은  $\int_0^a \lambda(u+s) du / a^2$ 의 불편추정량이며,  $\lambda(\cdot)$ 가  $a \times a$  정방지역내에서 그리 크게 변화하지 않으면  $\int_0^a \lambda(u+s) du / a^2 \approx \lambda(s)$ 이다. 따라서  $N(s, a) / a^2$ 은  $\lambda(s)$ 을 추정하게 된다.

본 연구에서는 관심지역내에 있는 모든 위치  $s \in A$ 에 대하여 집중도함수  $\lambda(s)$ 를 비모수밀도함수 추정방법인 커널 추정량(kernel estimator)을 사용하여 추정하려 한다(Diggle, 1985; Wand and Jones, 1995).  $A$ 지역내에서 발생한  $n = N(A)$ 개의 진앙지 위치를  $(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 이라하면  $\lambda(s)$ 에 대한 추정량  $\hat{\lambda}_h(s)$ 는  $s \in A$ 에 대하여,

$$\hat{\lambda}_h(s) = \frac{1}{P_h(s)} \left\{ \sum_{i=1}^n K_h(s - s_i) \right\} \tag{5}$$

가 된다. 이때,  $K_h(\cdot)$ 를 커널함수라하며 원점에 대하여 대칭인 함수이며,  $P_h(s) = \int_A K_h(s - u) du$ 이다. 여기서  $h = (h_1, h_2)$ 는 평활모수라 한다. 본 연구에서 사용될 커널함수는 최적커널인 Epanechnikov 커널로서 그 형태는  $u = (u_1, u_2)$ 에 대하여,  $K_h(u) = (3/4)^2 \prod_{i=1}^2 \left( 1 - (u_i / h_i)^2 \right) I_{\{|u_i|/h_i\} < 1}$ 이다.

이렇게 A지역내에 있는 모든 위치  $s$ 에 대하여  $\hat{\lambda}_h(s)$ 를 추정하여 A평면상에 투영함으로써 어느 부분지역이 지진발생 집중도가 강한지와 어느쪽으로 집중도의 방향이 향하고 있는지를 밝힐 수 있게 된다.

집중도 함수는 평활모수  $h_i$ 들의 크기에 따라 매끄럽게 혹은 거칠게 추정된다. 이는 추정위치  $s$ 에서의 집중도가  $s$  주위로부터 좌우로  $h_1$ , 상하로  $h_2$  이내에 관측된 진앙지 자료들을 가중 평균함으로써 구해지므로,  $h_i$ 들이 큰 값이면 많은 자료들을 사용하여 집중도를 추정하므로 전 지역에서의 추정된 집중도 함수는 매끄러운 형태를 갖는다. 반대로  $h_i$ 들이 작으면 가중 평균하는 자료의 수가 그만큼 작게 되므로 어느 지점에서는 아주 작고 어느 지점에서는 상대적으로 크게 추정되므로 전 지역의 집중도는 들쭉날쭉한 거친 형태가 된다. 그러므로 사용한 평활모수의 크기에 따라 추정된 집중도는 그 모양이 다를 수 있다. 한편 자료를 통하여 평활모수를 간편하게 추정할 수 있도록 Venables and Ripley(1994)는 다음과 같은 공식을 제안하였다. 즉, 일변량 자료  $x = (x_1, \dots, x_n)$ 에 대하여 평활모수  $h$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$h = 4 \times 1.06 \times \min(\sqrt{\text{Var}(x)}, \text{IQR}(x)/1.34) \times n^{-0.2} \quad (6)$$

여기서  $\text{Var}(x)$ 는 자료  $x$ 의 분산이며,  $\text{IQR}(x)$ 는 사분위수 범위를 나타낸다.

### 결과 및 토론

분석대상 자료인 역사지진과 계기지진의 진앙지 분포는 각각 Fig. 1과 3에 도시되어 있다. 실제 분석에서는 위도와 경도 좌표로 표시된 진앙을 좌측 하단 모서리를 원점으로 하여 실제거리(km)로 환산된 좌표 자료로 바꾼 후 이용하였다. 또한 진앙지가 기록되지 않은 지역을 최대한 배제하기 위하여 모든 진앙지 좌표자료를 포함하는 최소한의 사각형을 분석대상지역 A로 확정하였다.

먼저 역사지진의 경우  $N(A) = 268$ 이므로  $m \leq N(A) / 10$ 을 만족하도록 무작위성 검정을 위한 실제 자료점과 표본점을  $m = 26$ 개 무작위적으로 선택하였다. 또한  $\lambda$ 에 대한 추정값  $\hat{\lambda} = N(A) / |A| = 0.0024$ 을 계산하여  $T_1$ 과  $T_2$  검정 통계량을 계산하였다. 이러한 통계량 값을 이용하여  $N(1, 1/m)$ 과  $F_{2m, 2m}$ 분포로부터 유의확률( $p$ -값)을 계산한다. 그러나 무작위 추출된 실제

자료점과 표본점들의 개수가 작은 편이어서 이렇게 계산된 유의확률 값은 추출된 실제 자료점들과 표본점들에 의존한다. 이를 배제하기 위하여 100번의 검정을 실행한 후 계산된 유의확률들의 중위수를 계산하여 이것을 본 검정의 유의확률로 간주하였다.  $T_1$ 의 경우 이렇게 계산된  $p$ -값은 0이었으며,  $T_2$ 의 경우 0.012이었다. 그러므로 두 가지 검정방법 모두 유의수준 0.05하에서 진앙지 분포가 무작위적이라는 귀무가설을 기각하게 된다.

계기지진의 경우에서는 위에서와 동일한 절차에 따라  $m = 15$ 개의 실제 자료점과 표본점들이 선택되었으며  $T_1, T_2$ 에 대한 100번의 검정결과 계산된  $p$ -값들의 중위수는 각각 0.0과 0.025이었다. 따라서 계기지진 역시 유의수준 0.05 하에서 진앙지 분포가 무작위적이지 않다는 유의적인 결론을 얻게 된다.

공간자료의 무작위성을 검정할 수 있는 다른 방법으로는 최근접 거리의 경험분포를 이용하는 방법이 있다. 실제 자료점들간의 최근접 이웃거리  $W$ 와 표본점과 자료점간의 최근접 이웃거리  $X$ 의 경험분포를 아래와 같이 각각  $\tilde{G}_1, G_2$ 라 하자.

$$\begin{aligned} \tilde{G}_1(y) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(W_i \leq y) \\ \tilde{G}_2(y) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(X_i \leq y) \end{aligned} \quad (7)$$

이때  $I(\cdot)$ 는 지시함수(indicator function)이다.

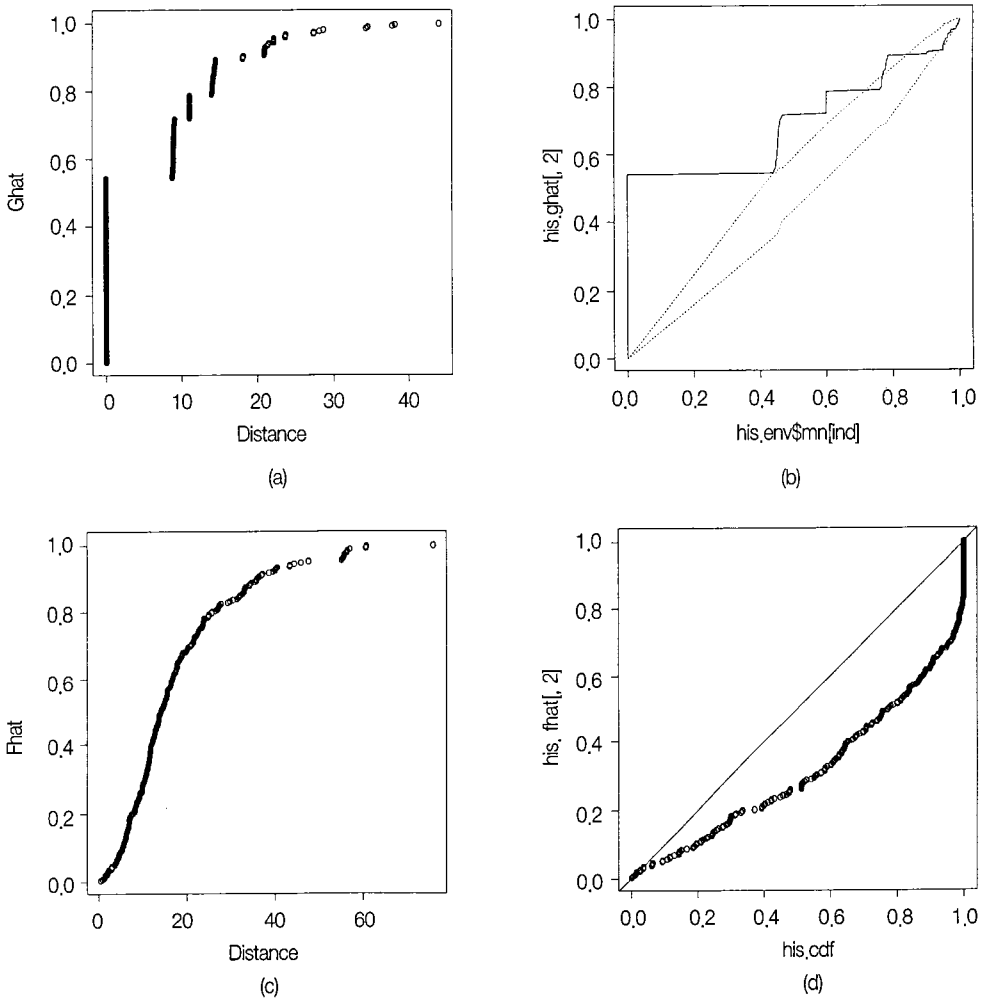
실제 자료점들이 완전 공간무작위적 이라면  $W$ 와  $X$ 의 분포함수  $G_1$ 과  $G_2$ 는 동일하게

$G_1(y) = G_2(y) = 1 - \exp(-\pi\lambda y^2)$ 의 형태를 갖는다. 따라서  $\tilde{G}_i$ 이  $G_i$ 과 비슷하면 공간자료들이 무작위적이라고 판단할 수 있다. 그러나 완전 공간 무작위성에서의 이론적인 분포함수와의 비교는 소위 경계효과(edge effects)가 없을 때 가능하다. 경계효과라 함은 관측점이나 표본점이 관심지역 A내에서만 수집된 것이므로 A지역내 경계선 근처의 자료와 더 가까운 자료가 A지역 밖에 존재할 수 있으므로 A지역내 경계선 근처의 최근접 이웃거리가 A 지역의 중앙에 위치한 그것보다 평균적으로 더 크게되는 상황을 의미한다. 따라서 경계효과가 존재한다고 생각이 되면 경험분포와 이론적인 분포함수와의 비교 대신 실제 자료를 이용한 이론적인 분포함수의 Monte Carlo 추정치를 비교한다. 즉 관심지역 A내에 완전공간 무작위적인  $n$ 개의 자료점들을 모의 실험으로 여러 번 생성하여 각각 경험분포  $\tilde{G}_i(y)$ 를 계

산한 후 그것들의 평균을 실제자료의 경험분포와 비교를 위한 기준선으로 삼고, 또한 최대, 최소를 구하여 그것을 외피(envelope)로 활용한다. 본 연구대상 자료들에 대하여 50번의 모의실험을 실시하였다. 만약 경계효과가 없다고 할 때는 경험분포  $\tilde{G}_1(y)$ 를 이론적인 분포함수의 추정치  $\hat{G}_1(y) = 1 - \exp(-\pi \hat{\lambda} y^2)$ 과 비교함으로써 무작위성을 판단할 수 있다.

본 연구에서는 경계효과가 있다는 가정과 없다는 가정 모두에 대하여 분석하였다. 즉, 경계효과가 있다는 가정하에서  $\tilde{G}_1$ 와  $\tilde{G}_1(y)$ 의 평균, 최대, 최소를 비교하였고, 경계효과가 없다는 가정하에서는  $\tilde{G}_2(y)$ 를  $\hat{G}_2(y)$ 와 비교하여 무작위성에 대한 결론을 도출하였다.

역사지진 자료의 경험분포  $\tilde{G}_1(y)$ (Fig. 5a)는 아주 작은 거리에 분포가 밀집되어 있음을 알 수 있으므로 이는 자료가 군집적이라는 것을 의미하며 따라서 무작위적이지 않음을 시사한다. Fig. 5b에서 경험분포  $\tilde{G}_1(y)$ 는 모의실험을 통한 분포함수의 평균 추정치를 의미하는 그림의 대각선분과 많은 차이를 보이며, 더욱이 모의실험 분포함수 추정치의 외피 밖에 대부분 위치함으로써 자료가 무작위적이지 않음을 확실히 보여 준다. Fig. 5c는  $\tilde{G}_2(y)$ 를 나타내며 Fig. 5d에 나타나 있듯이  $\tilde{G}_2(y)$ 가  $\hat{G}_2(y)$ 로부터 뚜렷하게 밑에 위치함은 실제 관측자료들이 군집적임을 의미한다. 만약  $\tilde{G}_2(y)$ 가  $\hat{G}_2(y)$ 에 걸려 있으면 자료가 무작위적임을 의미하고,  $\hat{G}_2(y)$ 의 상위에



**Fig. 5.** The empirical distribution, the Monte Carlo estimates, and the theoretical cumulative distribution of the nearest-neighbor distance for the historical seismicity data. (a)  $\tilde{G}_1(y)$ , (b) solid line:  $\tilde{G}_1(y)$ , upper dotted line:  $\max(\tilde{G}_1(y))$ , lower dotted line:  $\min(\tilde{G}_1(y))$ , X-axis: mean ( $\tilde{G}_1(y)$ ), (c)  $\tilde{G}_2(y)$ , (d) circles:  $\tilde{G}_2(y)$ , solid line (and X-axis):  $\hat{G}_2(y)$ .

위치하면 규칙적임을 의미한다. 계기지진 자료에 대해서는 Fig. 6에 그 결과들이 나타나 있으며, 역사지진 자료에서 얻은 결론과 동일함을 알 수 있다.

한편, Fig. 7에 역사지진과 계기지진 자료에 대한 집중도를 각각 두 가지 평활모수를 이용하여 관심지역 전체에서 추정된 결과를 등치선도로 나타내었으며, 등치선도의 숫자는 상대적인 의미를 갖는다. Fig. 7의 (a)와 (c)는 역사지진과 계기지진 자료에 대하여 Venables and Ripley(1994)의 방법에 따른 평활모수를 사용한 것이다. 역사지진에 대하여는  $h_1 = 101, h_2 = 121$ 로 추정되었고, 계기지진은  $h_1 = 213, h_2 = 248$ 로 계산되었다. Fig. 7의 (a)에서 보면 역사지진의 경우 충청남도

대구 경북지역에서 집중도가 크게 나타나 있으며 두 지역을 잇는 축에서 멀어질수록 낮아지는 특성을 보여주고 있어 세밀한 지역 특성을 살피기에는 부족한 결과이며, 따라서 너무 큰 평활모수를 사용했음을 알 수 있다. 세밀한 지역적 집중도의 특성과 방향성을 탐색하기 위해 보다 작은 여러 가지 평활모수를 사용하여 추정된 결과 Fig. 7의 (b)와 같이  $h_1 = 30, h_2 = 40$ 에서 비교적 만족한 그림을 얻었다. Fig. 7의 (b)에서 살펴보면 경기, 충남, 전북, 그리고 대구 지방에서 비교적 높은 집중도 봉우리가 보이며, 강원도 내륙과 강원도 해안에서도 다른 지역보다 약간 더 밀집된 집중도를 띠고 있음을 알 수 있다. 집중도의 방향성은 크게 서해안 내륙을

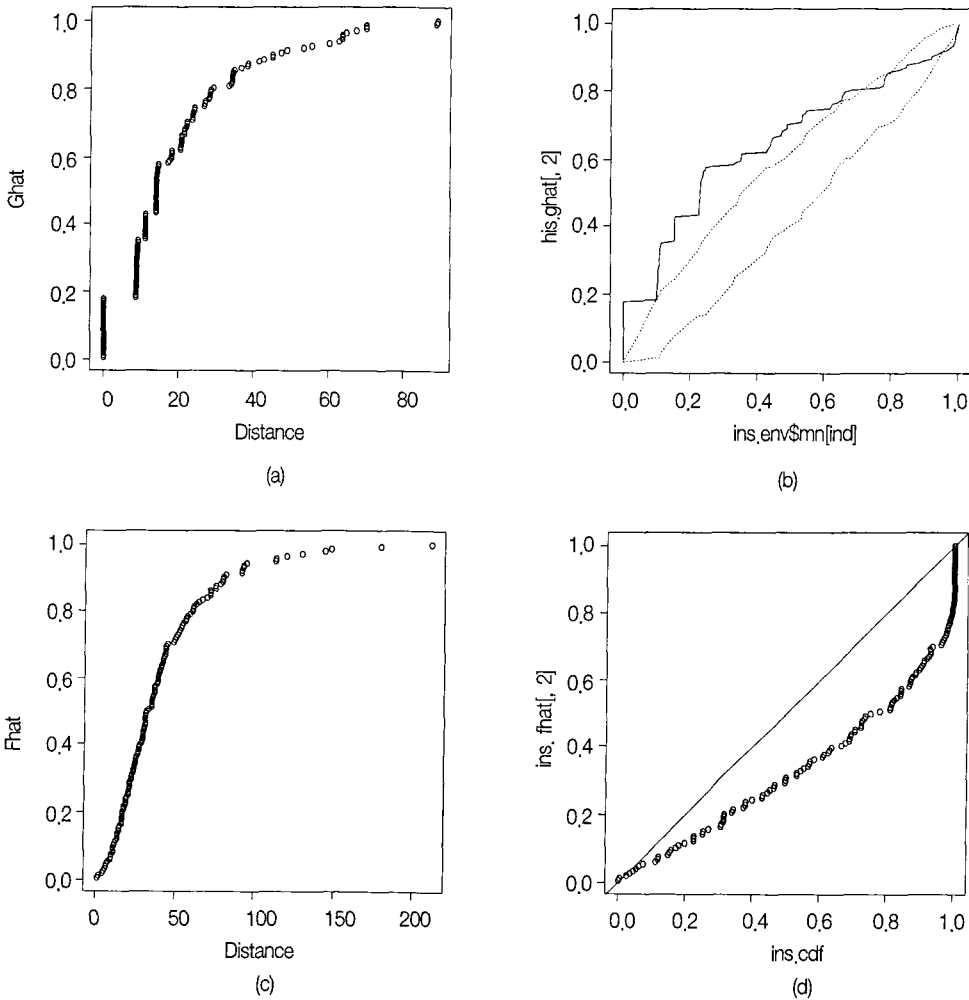


Fig. 6. The empirical distribution, the Monte Carlo estimates, and the theoretical cumulative distribution of the nearest-neighbor distance for the instrumental seismicity data. (a)  $\tilde{G}_1(y)$ , (b) solid line:  $\tilde{G}_1(y)$ , upper dotted line:  $\max(\tilde{G}_1(y))$ , lower dotted line:  $\min(\tilde{G}_1(y))$ , X-axis: mean ( $\tilde{G}_1(y)$ ), (c)  $\tilde{G}_2(y)$ , (d) circles:  $\tilde{G}_2(y)$ , solid line (and X-axis):  $\hat{G}_2(y)$ .

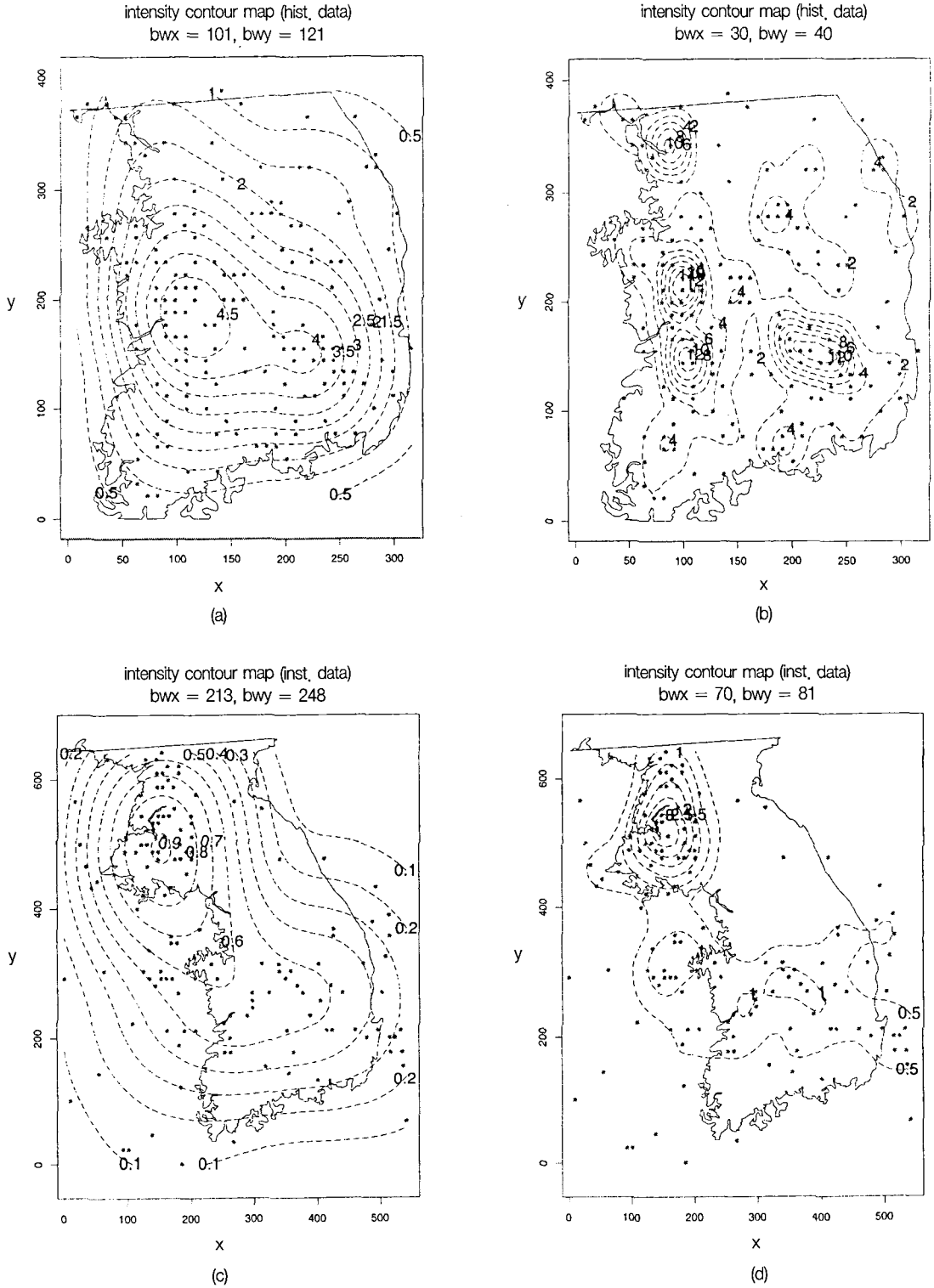


Fig. 7. The contour plot of the degree of concentration, (a) historical seismicity( $h_1 = 101, h_2 = 121$ ), (b) historical seismicity ( $h_1 = 30, h_2 = 40$ ), (c) instrumental seismicity ( $h_1 = 213, h_2 = 248$ ), (d) instrumental seismicity( $h_1 = 70, h_2 = 81$ ).



따라 남북방향으로 한 축이 있고 충남과 대구 경북을 잇는 비스듬한 축이 존재함을 알 수 있다.

Fig. 7의 (c)는 계기지진에 대하여 Venables and Ripley(1994) 방법에 의하여 추정된 평활모수( $h_1 = 213$ ,  $h_2 = 248$ )을 사용한 결과이며, 대략적으로 황해도-충남 앞바다-경북 내륙을 잇는 L자 형태의 집중도 구조를 가지고 있음을 알 수 있다. Fig 7의 (d)에서는 보다 작은 평활모수( $h_1 = 70$ ,  $h_2 = 81$ )을 사용한 결과이며, 이는 (c)의 결과를 더욱 구체적으로 뒷받침하고 있고 특히 경북지역의 집중도 방향성이 대구 지역으로부터 동북방향과 동남방향의 두 가지가 존재함을 나타내고 있다. 특기할만한 사실은 이러한 집중도 분석으로 얻어진 등치선도가 다른 연구에서 얻어진 지진재해지도(예를 들면, 건설교통부, 1997)와 유사하다는 것이다. 이러한 집중도 추정에서 개개의 지진은 규모에 관계없이 하나의 자료로 취급되었으나, 규모에 맞는 적절한 가중치의 도입이 필요할 것으로 사료된다. 또한 평활모수를 변화시켜, 좀 더 상세한 특성을 조사하는 후속의 연구가 요구된다.

## 결론

본 연구에서는 한반도에서의 진앙분포를 다른 지구 과학적 정보없이 공간 통계학 방법을 이용하여 지진발생의 무작위성에 대한 검정과 집중도의 추정을 수행하였다. 그 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 역사지진과 계기지진의 두 가지 분석대상 자료에 대하여 무작위성에 대한 통계적 검정은 검정통계량을 이용한 방법과 경험분포를 이용한 방법을 사용하였으며, 두 자료 모두 무작위적이지 않고 군집적인 분포를 가지고 있는 것으로 판명되었다.
- 2) 비모수 밀도함수 추정방법을 이용한 진앙지 분포의 집중도는 역사지진의 경우 수도권, 충남, 전북, 대구 지역에서 높게 나타나 있었다. 계기지진의 경우에는 황해도-충남 앞바다-경북 내륙을 잇는 L자 형태의 집중도를 나타내고 있으며, 다른 연구에서 얻어진 지진재해지도와 유사한 특성을 보여 준다.

## 사사

본 논문을 세심하게 심사하여 논문의 질을 높여 주신 한국고원대학교의 경제복교수와 익명의 심사위원에게 감사드린다. 이 연구는 1998년도 전남대학교 학술연구비의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드린다.

## 참고문헌

- 건설교통부, 1997, 내진설계 기준연구(II), 건설교통부.  
 기상청, 1992, 1978-1992 지진관측보고, 기상청.  
 김성균, 1997, 한반도의 지진활동: 과거, 현재, 미래. 콘크리트 학회지, 9, 4-12.  
 한국동력자원연구소, 1983, 한반도의 지진위험도, 한국동력자원연구소.  
 Cochran, W. G., 1954, Some methods for strengthening the common  $\chi^2$  tests, *Biometrics*, 10, 417-451.  
 Cressie, N, 1991, *Statistics for Spatial Data*, John Wiley & Sons, New York.  
 Diggle, P. J, 1985, A kernel method for smoothing point process data, *Applied Statistics*, 34, 138-147.  
 Greig-Smith, P., 1952, The use of random and contiguous quadrats in the study of the structure of plant communities, *Annals of Botany*, 16, 293-316.  
 Hopkins, B., 1954, A new method for determining the type of distribution of plant individuals, *Annals of Botany*, 18, 213-217.  
 Kyung, J.B., 1989, The characteristics of the seismicity of the Korean Peninsula, Dr. Thesis, Seoul National University.  
 Lee, K. and Noh, M.H., 1988, A probabilistic analysis of the seismic risk in Korea(I), *Jour. Geol. Soc. Korea*, 24, 62-70.  
 Lee, K. and Jin, Y.G., 1989, A probabilistic analysis of the seismic risk in Korea(II), *Jour. Geol. Soc. Korea*, 25, 59-71.  
 Ludwig, J. A. and Goodall, D. W., 1978, A comparison of paired with blocked quadrat variance methods for the analysis of spatial pattern, *Vegetatio*, 38, 49-59.  
 Pielou, E. C., 1959, The use of point-to-plant distances in the pattern of plant populations, *Journal of Ecology*, 47, 607-613.  
 Venables, W.N. and Ripley, B.D., 1994, *Modern Applied Statistics with S-PLUS*, Springer-Verlag, New York.  
 Wand, M. P. and Jones, M. C., 1995, *Kernel Smoothing*, Chapman & Hall, London.