

A Study on the Decision of KTX Network Link for Risk Management by Earthquake Vulnerability

Jin Ki Eom^{1#}, Sun Myeong Jang², Yong Un Ban³, Tae Young Heo^{4*}

¹ Korea Railroad Research Institute, 176 Railroad Musium Road, Uiwang, Korea

² Chungbuk Science High School, 153-135 Gyoyukwon-ro, Sangdang-gu, Cheongju, Korea

³ Department of Urban Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-Gu, Cheongju, Korea

⁴ Department of Information Statistics, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Heungduk-gu, Cheongju, Korea

Abstract

This study presents the area exposed to the risk of earthquakes on KTX routes by examining the magnitude of earthquakes based on spatial statistics analysis. In order to find the clustering pattern, various functions were used such as G, F, K function. As a results, a specific clustering pattern for earthquakes in Korea emerged. As we find that an area in Gyeongbu line of KTX between Ulsan and Busan (52km) is exposed to high risks of earthquakes, improvement of the safety of railroad facilities is required. On the other hand, our research findings indicate that Honam line is exposed to relatively low risks. These results could be informative to determining high-priority areas for structural reinforcement of the facilities to prevent earthquake-related railroad accidents, thus suggesting a need for further analysis on the entire railroad and transportation network.

Key words: seismic reinforcement, earthquake crisis control, KTX routes, spatial statistics

1. 서론

지진발생에 대한 공간적 분포의 연구에 있어 지진의 기록은 무엇보다 중요하여 최근의 계기지진 기록뿐만 아니라 역사서 속의 역사지진까지 분석대상이 되고 있다. 다양한 문헌의 역사기록을 토대로 밝혀진 한반도의 지진발생 횟수는 서기 27년부터 현재까지 약 1,900회에 이르며 울진-삼척 인근에서 발생한 지진이 규모 9로 최대 규모이며 진도 7 이상의 지진도 약 45회 남짓 이

는 것으로 나타났다. 지진계가 설치된 1905년 이후 가장 큰 지진은 규모 5.1의 지리산 쌍계사 지진으로 4명의 부상자와 113동의 가옥피해가 발생하였고 이외에 규모가 큰 유감지진으로는 규모 4.5~5.0 사이의 속리산지진, 사리원지진, 홍성지진 등이 있다.

지진발생은 본격적인 지진계측이 이루어진 1978년부터 2005년까지 총 678회에 이르며 연평균 25회 이상 발생하였으며 현대식 지진관측망의 확대와 함께 90년대 중반 이후 뚜렷한 증가추세를 보이고 있으나, 유감지진

The 1st author: Jin Ki Eom, Tel. +82-31-460-5467, Fax. +82-31-460-5359, e-mail. jkom00@krii.re.kr

* Corresponding author: Tae Young Heo, Tel. +82-43-261-3741, e-mail. theo@cbnu.ac.kr

과 규모 3.0 이상 지진의 발생경향은 뚜렷한 변화가 관찰되지 않고 있다. 특히, 진도 규모 4.8을 기록한 오대산 지진은 지진 안전지대로 인식되던 강원도에도 지진대책의 필요성이 제기되는 계기가 되었으며, 그동안 한반도는 유라시아 지각판의 판 내부에 자리하여 지진으로부터 안전한 것으로 평가되어 왔으나 오대산 지진으로 인해 판내에서도 지진이 발생하는 것으로 분석되었다.

오대산 지진사례와 판구조론에 근거할 때 수년 내 한반도 내륙에서 최소한 규모 5.0의 강진이 발생할 가능성이 경고되고 있으며, 지진을 연구하는 학자들은 한반도가 판과 판이 만나서 발생하는 대규모의 판 경계형 지진이 발생하는 지역이라기보다 판 내부에서 발생하는 중 혹은 소규모의 판 내부형 지진이 발생하는 지역이라고 보고 있다.

우리나라는 지진에 대한 계기관측이 본격화된 시점부터 지진에 대비한 내진설계 기준을 준비하기 시작하여 원자력 발전소, 댐, 터널, 건축물, 고속철도, 도로교 등의 다양한 시설물에 대해서 단계적으로 내진설계를 추진해 왔다. 중국의 경우 지진 발생 취약 지역 지도에 대한 연구를 진행 중에 있으며, 이를 바탕으로 지역에 따라 건물 건축 제한 등과 같은 건축 허가 기준도 다르게 적용할 예정에 있다.

특히, 철도시설물의 지진대책과 관련된 연구로서는 한국철도연구원에서 2004년 신간선 탈선과 관련하여 한국철도의 지진에 대한 대책 수립의 방향성에 대해 연구를 시작하였다.

지진대비책으로서 철도시설물 및 철도 운영방안을 살펴보면 크게 세 가지로 제시하고 있다. 첫째, 지진 피해 경감 및 대비를 위한 내진 설계 및 내진 보강 방안을 마련하여 지진 발생 시 피해를 최소화 하는 것이며, 둘째는 지진조기검지 경보시스템 구축의 필요성을 경제성 및 효과성을 고려하여 검토하는 것이며, 세 번째는 지진피해 복구방안을 마련하여 지진피해를 신속히 수습하고 열차운행의 정상화이다.

본 연구에서는 한반도 지진 발생 패턴에 따른 지진 발생 취약 지역에 대한 KTX망 내진보강 순위 결정에

할 수 있도록 한반도의 지진 위험 지역을 공간통계 방법론 중 공간 점 패턴 분석을 이용하고자 한다. 일반적으로 공간 점 패턴(Spatial Point Pattern) 자료는 일정한 경계를 가지고 있는 지역(Region)에서 불규칙하게 위치하고 있는 점 사상(Point Event)의 집합으로 자연적으로 발생하는 위치나 사회적 사건(Events)를 의미한다(Diggle, 1983). 점 사상의 예를 들면, 지진, 산불 등과 같은 자연 재해 발생 위치, 천연기념물 등과 같은 특정 식물의 위치, 사회적 사건으로는 범죄나 구제역(Foot Mouse Disease, FMD)과 조류 독감(Avian Influenza, AI) 등과 같은 질병의 발생 위치 등으로 표현된다(Ripley, 1976; Chuvieco & Salas, 1996; Pew & Larsen, 2001; Kasischke & Barry, 2002)

공간 점 패턴 분석(Spatial Point Pattern)은 점 사상의 공간적 분포가 무작위성을 띠는지 또는 특정한 군집의 형태를 띠는지 파악하는데 활용할 수 있다. 공간 점 패턴 분석 접근법은 공간상에서 발생하는 자료의 발생 위치와 빈도수를 이용하여 공간상의 특정한 패턴을 발견하고, 그에 따른 군집성을 분석하여 인근 지역과의 상관성을 분석하는 방법이다(Diggle, 1983).

공간상에서 점 패턴을 탐색하는 가장 기본적인 방법으로는 동일한 단위지역 내에 자료의 빈도수를 2차원으로 표현하는 방법인 커널(Kernel) 추정법과 최근린 거리(Nearest Neighbor Distance)등을 통해 공간상의 사건 발생에 대한 집중도(Intensity)에 대한 강도를 분석하는 방법이 있다. 연구 관심 지역 내 점 사상들의 패턴의 상관관계를 밝히려면 공간 의존성을 분석할 수 있는 K-함수 등을 수행해야 한다. 커널 추정과 최근린 거리 등의 집중도에 대한 강도분석을 통해서도 점 자료의 전역적 분포 패턴을, 국지적 분포패턴을 분석할 때는 K-함수를 이용한다(Diggle, 1985; Getis & Franklin, 1987; Dixon, 2002).

본 연구에서는 철도시설물의 내진설계 또는 시설물 보강을 위해 우선적으로 고려해야 할 지진 취약 구간을 파악하기 위한 기초 연구를 수행하고자 하며 과거 지진 발생자료를 이용하여 지진의 강도에 따른 공간적 파급

효과를 분석하여 지진 발생 위험에 노출정도를 공간적으로 제시하고자 한다.

II. 자료

1. 지진 자료

지진 자료는 기상청과 한국지질자원연구원에서 인터넷상에서 지진발생 위치와 규모를 제공하고 있으며, 기상청 지진 자료의 경우 한반도에 지진 계측이 가능한 관측소가 확충된 1978년부터 기록된 지진발생 위치 및 규모를 제공하고 있고 한국지질자원연구원에서는 1985년부터 현재까지의 지진자료이다. 본 연구에서 사용된 지진자료는 기상청에서 제공하고 있는 지진 자료를 이용하여 지진의 공간적 분포 및 다양한 공간 점 패턴 분석을 실시하였다.

2. KTX 망

KTX는 Korea Train Express의 약자로 한국의 고속 철도를 의미하며, 우리나라의 경우 열차가 주요 구간을 시속 200km 이상으로 주행하는 철도로서 건설교통부장관이 그 노선을 지정하고 고시하는 철도로 규정되어 있다. KTX가 개통된 것은 2004년 4월 경부선 1단계(서울-동대구) 구간이 개통되었고 <Figure 1>과 같이 현



Figure 1. KTX Route

재 KTX는 경부선, 호남선, 경전선, 전라선 4개가 운영되고 있다.

III. 공간통계

공간통계학은 다양한 통계기법을 이용하여 공간상에서 발생한 공간 현상의 특성을 설명하고 그와 관련된 가설들을 검증하며 그 현상이 관측되지 않은 지점에서의 데이터 값을 예측해내는 과정이다. 특히 Cressie (1993)는 공간자료를 지리통계자료, 격자자료, 점 패턴 자료와 같이 세 가지로 분류하였으며, 격자자료는 규칙적이거나 불규칙적인 면단위와 관련된 자료이고, 지리통계 자료는 공간상에서 연속적인 변동과 관련된 자료이며 점 패턴 자료는 공간상의 위치에서 사건의 발생에 대한 자료이다.

1. 공간 점 패턴 분석

일정한 경계를 가지는 지역에 불규칙하게 위치하고 있는 점 사상들의 집합으로써, 지진 발생, 구제역 등과 같은 특정 질병의 발생과 같은 자연적으로 발생하는 현상들의 위치나 범죄 발생 위치 등과 같은 사회적 사건들을 의미한다. 공간 점 패턴 분석은 점 사상의 공간적 분포를 파악하여 완전히 공간적으로 무작위성(complete spatially randomness, CSR)의 행태를 가지고 있는지 군집성(clustering)의 행태를 가지고 있는지 확인할 수 있다(Baddeley & Silverman, 1984).

연구 지역 내의 점 사상들의 유의미한 공간적 패턴을 확인하기 위해 통계적 검정 방법을 이용한다. 공간적 패턴에 대한 통계적 검정을 위한 귀무가설(H_0)과 대립가설(H_1)은 다음과 같다(Schabenberger & Gotway, 2005).

H_0 : 점 사상들이 완전히 공간적으로 무작위성을 보인다.

H_1 : 점 사상들이 공간적으로 군집되어 있거나 분산되어 있다.

CSR은 연구 지역 내에 걸쳐 점 사상들이 동질한 포아송 과정을 따른다고 가정하고 있다. 즉, 점 사상들의 밀도(density)가 연구 지역 내에서 일정하며, 연구지역을 세분화한 세부 지역에서의 점 사상들의 빈도에 대한 분포는 포아송 분포를 따른다. 또한 세분화된 지역에서의 점 사상의 수는 연구 지역내 의 다른 세분화된 지역의 점사상의 수와 같으며, 한 세분화된 지역의 점사상의 수는 다른 세분화된 지역의 점 사상의 수와는 독립이다.

2. 진앙지에 대한 공간적 분포

지구 표면을 이루고 있는 지각은 유라시아판, 아프리카판, 필리핀판, 태평양판, 북미판 등 여러 조각의 지각으로 이루어져 있다. 이러한 판은 연약권이라고 불리는 점성을 가진 층 위를 움직이게 되는데 이러한 판이 이동하면서 서로 부딪치거나 잡아 당기게 되는데 이로 인해 판 경계부나 판 내부의 연약한 지역에 응력이 오랜시간 동안 축적되고 지진을 발생시킨다.

우리나라의 경우 유라시아판 내부에 위치하고 있기 때문에 지진발생의 빈도와 진도가 낮지만 황해로부터 한반도를 가로지르는 형태를 띠는 것을 확인할 수 있다. <Figure 2-3>에서와 같이 진도별로 살펴보면 진도 2의 경우 한반도 내부에서 자주 발생하며 진도3의 경우 대구, 울산지역에서 빈번하게 발생하며 진도4의 경우 동해안지방을 따라 발생하며 특히 울산지역에서 빈번

하게 발생하고 진도5의 경우 내륙지방보다는 해안지방에 간간이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

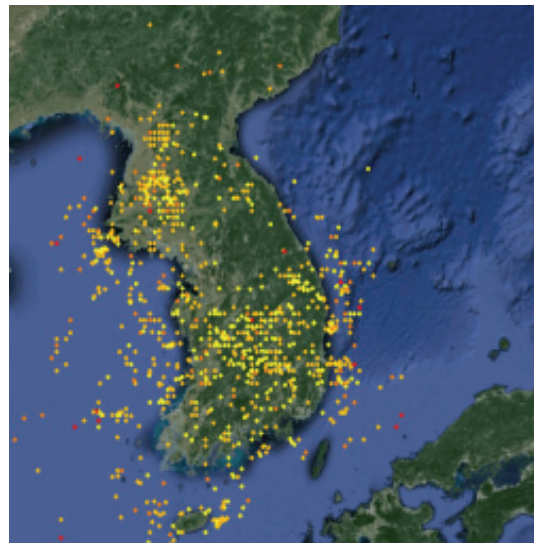


Figure 2. Spatial distribution of entire epicenter in Korea

3. 지진 발생 집중도

1) 1차 특성 탐색

지진 발생 집중도를 확인하기 위해 1차 특성 분석 방법으로 쿼드랫 분석 방법과 커널 밀도(Kernel Density) 분석을 수행하였다. 지진 발생에 대한 집중도(intensity)를 시각적으로 분석하기 위해 연구 지역 내에서 발생한 지진 발생의 공간적 밀도를 분석하고 모형화하기 위한 다양한 방법 중 가장 단순한 방식인 쿼드랫분석법

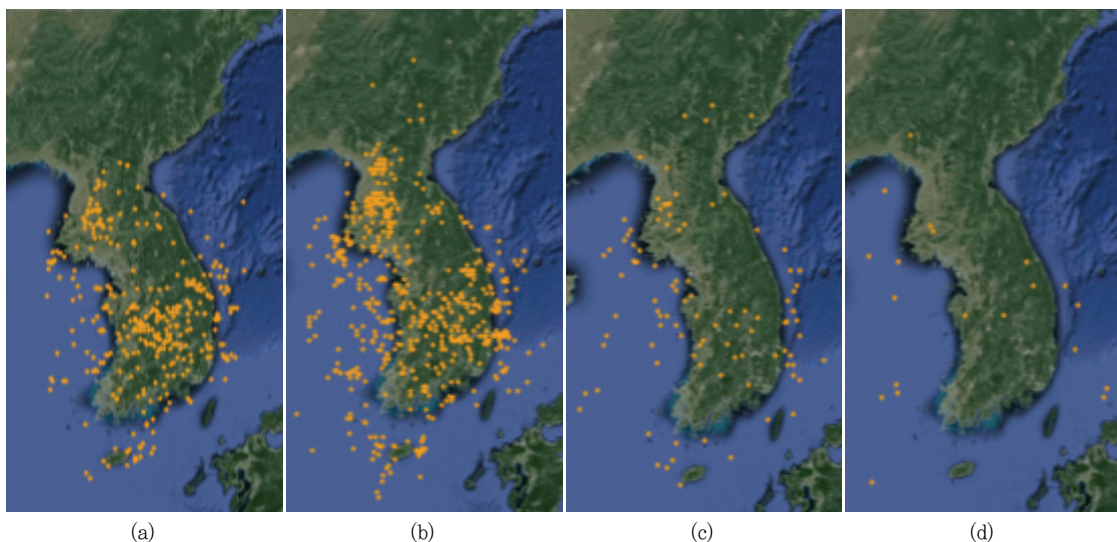


Figure 3. Spatial distribution of Seismic intensity2 (a), Seismic intensity3 (b), Seismic intensity4 (c), Seismic intensity5 (d)

(Quadrat analysis)을 이용하였다. 공간 점 패턴 분석에서 가장 단순한 쿼드랫(Quadrat) 분석은 공간 점 패턴 자료의 공간 배열 상태가 무작위성(Randomness), 군집성(Cluster), 규칙성(Regular)의 여부를 판단하고 분석하기 위한 가장 단순한 방법으로 쿼드랫 방법은 전체 연구 지역을 동일한 면적의 작은 쿼드랫으로 나누고 각 쿼드랫에 포함되는 점 사상의 수를 셈으로써, 공간 프로세스의 집중도를 파악한다(Diggle, 1983).

커널 밀도 분석은 연구지역 내 각각의 개별 사건으로부터 일정폭(Bandwidth) 내에 포함된 참조 점까지의 거리를 이용해 커널 함수(Kernel Function)로부터 완전한 누적밀도 함수를 도출해내는 방법으로 연구지역의 점 개체의 분포를 토대로 하여 연구지역 전체에 걸친 공간밀도를 추증하는 방법이다(Silverman, 1981; Stone, 1984). 커널 밀도 추정은 격자들의 중심점 간의 거리가 증가할수록 공간적 연관성이 감소하는 특성을 가지고 있다.

2) 2차 특성 탐색

지진 발생 집중도를 확인하기 위해 2차 특성 분석 방법으로 G함수, F함수 그리고 K함수를 이용하였다. G함수는 가장 가까운 점과 거리에 대한 누적분포 빈도를 나타내며, n 개의 관측지점에 대한 경험적 누적분포함수는 $\hat{G}(r) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(d_i \leq r)$ 과 같이 계산한다. 점 개체들이 군집화되어 있다면 짧은 거리에서 $\hat{G}(r)$ 값은 증가하며, 점 개체들이 균등하게 분포되어 있다면 $\hat{G}(r)$ 값이 서서히 증가하는 패턴을 보이는 특징을 가지고 있다. 결과적으로 경험적 누적분포함수인 $\hat{G}(r)$ 과 포아송과정에서의 $G_{pois}(r)$ 과 비교하여 $\hat{G}(r) > G_{pois}(r)$ 일 경우 군집을 이루고 있다고 판단하며, $\hat{G}(r) \leq G_{pois}(r)$ 일 경우 규칙적인 패턴을 보인다고 판단한다.

F함수는 G함수와 달리 m 개의 점을 임의로 분포시킨 후에 임의로 분포한 점들과 실제 점 개체들 간의 가장 가까운 거리를 측정 후 $\hat{F}(r) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m I(d(u_k, x) \leq r)$

를 계산한다. F함수는 G함수와 달리 경험적 누적분포함수인 $\hat{F}(r)$ 과 포아송과정에서의 $F_{pois}(r)$ 과 비교하여 $\hat{F}(r) > F_{pois}(r)$ 일 경우 규칙적인 패턴을 보인다고 판단하며, $\hat{F}(r) \leq F_{pois}(r)$ 일 경우 군집을 이루고 있다고 판단한다.

G함수와 차이 m 개의 점이 임의로 추가되었기에 새로운 가장 가까운 거리가 계산되며, F함수는 표본 점들이 많기 때문에 누적빈도의 곡선이 G함수에 비해 완만하게 나타난다는 특성을 가지고 있다.

K함수는 점 개체의 분포에 영향을 미치는 이차적 속성을 파악하고자 하는 경우에 활용한다. 이는 K함수는 점 개체의 공간적 배열상태를 평가하기 위해 점 개체의 분포 상태가 공간적 상호작용에 의해 형성되었는가를 분석하는 것이다. 특정지점으로부터 일정 거리 내의 실제적으로 분포하는 점 개체의 수와 이론적으로 규칙적인 분포일 경우 점 개체의 수를 비교함으로써 분포의 임의성을 판단할 수 있다. 결과적으로 경험적 누적분포함수인 $\hat{K}(r)$ 과 포아송과정에서의 $K_{pois}(r)$ 과 비교하여 $\hat{K}(r) > K_{pois}(r)$ 일 경우 군집을 이루고 있다고 판단하며, $\hat{K}(r) \leq K_{pois}(r)$ 일 경우 규칙적인 패턴을 보인다고 판단한다(Ripley, 1976).

IV. 분석 및 결과

1. 지진의 규모 분석

분석에 사용된 지진자료는 기상청에서 제공하는 자료로 1978년 8월부터 2014년 4월까지 자료를 사용하였다. 총 1110개의 자료로 구성되어 있으며 이는 한반도 전체 지역에서 관측한 자료이며 진도2는 379번(34.1%), 진도3은 609번(54.9%), 진도4는 102번(9.2%), 진도5는 20번(1.8%) 발생하였다. 특히 KTX가 설치되어있는 대한민국 내륙지방의 경우 384번 지진이 일어났으며 진도2는 178번(46.4%), 진도3은 183번(47.7%), 진도4는 19번(4.9%), 진도5는 4번(1%) 발생하였다. 따라서 분석에서는 KTX가 설치되어있는 대한민국 내륙지방의 지진자료를 이용하여 분석을 실시하였다.

2. 1차 특성 탐색

1차 특성 탐색은 쿼드랫 분석과 커널밀도분석으로 나누어 볼 수 있으며 두 방법은 집중도(intensity)를 이용하여 점들의 군집성을 파악하는 것이다. 본 논문에서 쿼드랫 분석은 관심지역을 15×15의 부분지역으로 나누어 각 부분지역에서 지진빈도를 세고 집중도를 계산한 후 분석을 실시하였다. 225개의 부분지역 중 191개의 부분지역이 내륙지방을 포함하며 이를 토대로 분석한 결과는 다음 <Table 1>과 같다.

Table 1. Results of test for randomness with quadrat analysis

χ^2 -statistic	degrees of freedom	p-value
572.601	190	<0.001

카이제곱 검정결과 유의확률이 <0.001으로 매우 작아 유의수준 0.05하에서 귀무가설을 기각할 수 있어 대한민국에서 발생하는 지진은 군집을 띤다고 할 수 있다. 각 부분지역에 대하여 잔차를 계산하여 2보다 크거나 -2보다 작은 지역을 표현하면 아래 <Figure 4>와 같이 표현할 수 있다.

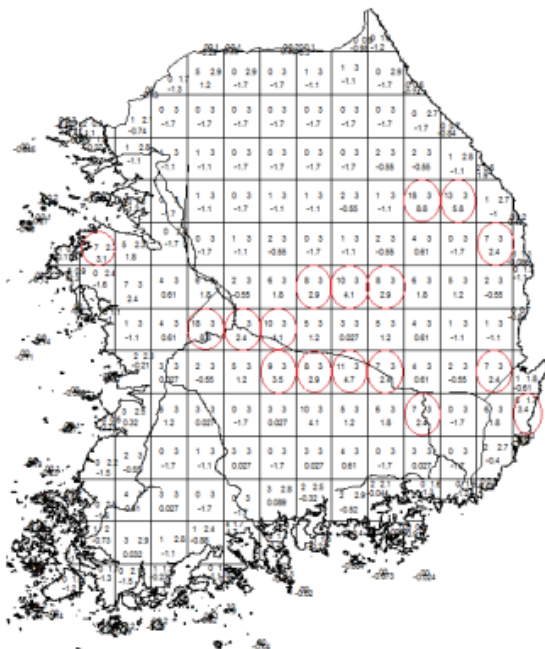


Figure 4. Lattice of Earthquakes

군집은 강원도의 태백지역과 대전-구미-대구로 이어지는 구간과 포항-울산구간에 군집을 이루는 것을 확인 할 수 있으며 이러한 지역은 지진의 빈도가 과하게 일어나는 것을 말해준다. 커널밀도분석은 커널함수와 일정폭을 이용하여 발생빈도에 대한 확률밀도함수를 추정하는 것이다. 합리적인 폭을 선택하기 위하여 관측된 각 진원지로부터 가장 가까운 진원지와 거리를 계산하여 중위수를 이용하여 커널밀도분석을 실시하였다.

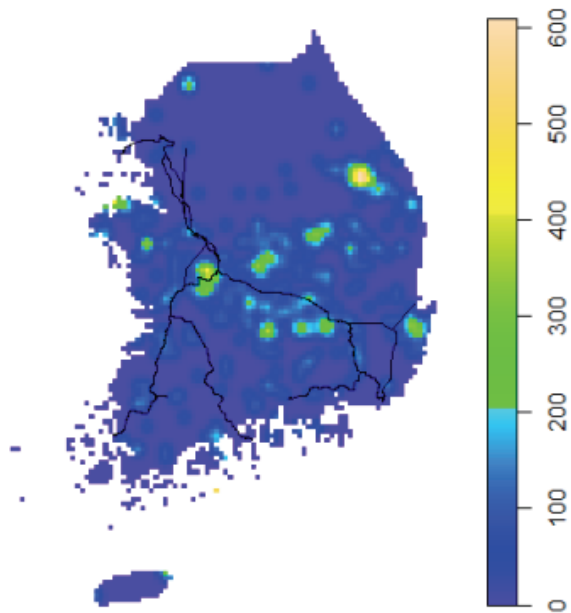


Figure 5. Map for kernel density analysis

<Figure 5>에서와 같이 쿼드랫 방법과 비슷하게 태백지역과 대전-구미-대구로 이어지는 구간과 포항-울산구간에 높은 확률밀도를 보이므로 이러한 지역은 지진 위험이 크다고 할 수 있다.

3. 2차 특성 탐색

2차 특성 탐색은 <Figure 6>과 같이 거리측정에 따라 3가지 함수로 구분되어 군집성을 파악한다. F함수는 이론적 누적분포함수인 $F_{pois}(r)$ 과 추정된 누적분포함수를 비교해보았을 때 $\hat{F}(r) \leq F_{pois}(r)$ 이므로 군집성을 띤다고 판단할 수 있다. F함수와는 반대로 G함수는 이론적 누적분포함수인 $G_{pois}(r)$ 와 추정된 누적분포함수

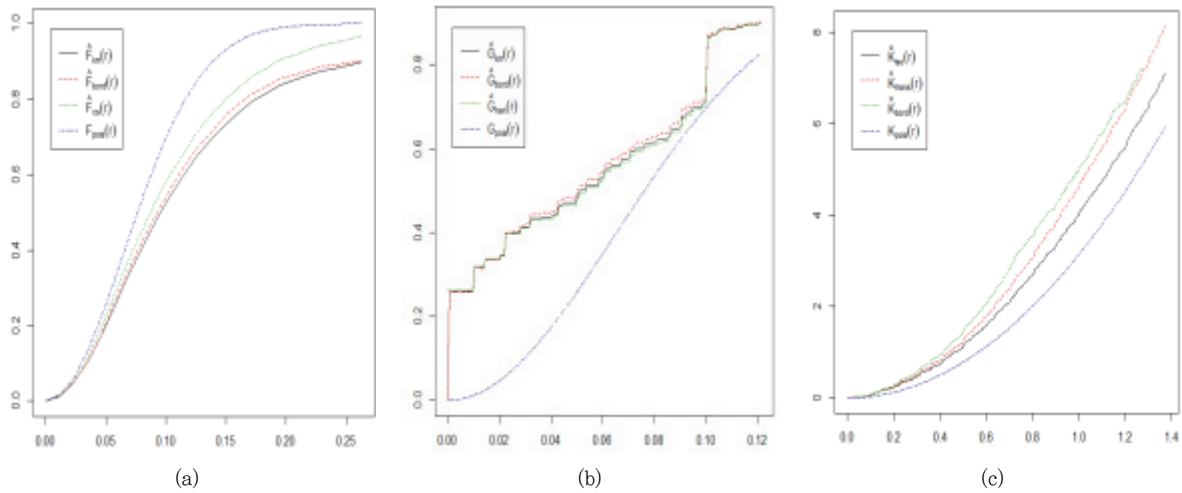


Figure 6. Plots of F function(a), G function(b), K function(c)

를 비교해보았을 때 $\hat{G}(r) \geq G_{pois}(r)$ 이므로 균집성을 띤다고 판단할 수 있다. K함수 또한 $\hat{K}(r) > K_{pois}(r)$ 를 만족하므로 균집성을 띤다고 할 수 있다.

공간점패턴분석을 통하여 진앙지에대한 균집성을 살펴보았으며 모든 분석에 대해서 대한민국에서 발생하는 지진은 균집을 띠고 있는 것을 확인할 수 있으며 강원도 태백지역과 대전부터 구미로 이어지는 구간과 포항과 울산을 잇는 구간에서 지진이 집중되어 발생하는 것을 알 수 있다. 아래 <Figure 7>은 KTX노선을 중심으로 지진이 발생하는 진원을 표시한 것이다.

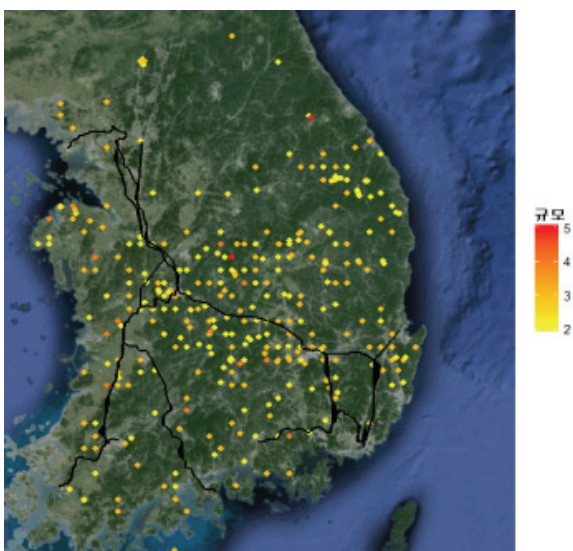


Figure 7. KTX routes and epicenter

V. 결론

우리나라의 내진설계의 목적은 큰 지진에 의한 손상을 최소화하는 것으로서 최악의 경우 시설물 붕괴방지를 목적으로 하여 재해방지보다는 재해저감에 그 목적이 있다고 할 수 있다. 이러한 국가적 차원의 대비에도 불구하고 대지진이 발생할 경우 큰 피해가 불가피한 것으로 분석된다. 특히 궤도, 노반, 교량 및 터널 등으로 구성되어 있는 철도 시설물은 지진에 취약하기에 철도의 안전 확보를 위해 지진발생 위험도를 조기에 분석하여 열차탈선 및 화재와 같은 2차 피해를 최소화 할 수 있도록 내진설계 보강을 조속히 추진해야 할 것이다. 이러한 내진설계 및 보강에는 막대한 비용이 소요되는 사업이므로 지진에 취약한 지역에 위치한 철도시설물에 대해 우선적으로 사업비가 투입되어야 한다. 특히 KTX는 고속으로 운행하여 지진발생시 탈선에 따른 사고 발생 가능성이 높고 승객의 사망 및 부상에 따른 사고 위험도가 크므로 지진발생에 취약한 구간을 찾아내어 우선적으로 시설물을 보강할 필요가 있다.

본 연구에서는 이러한 한국철도연구원의 지진대비 철도시설물 및 철도 운영방안을 보다 세밀히 할 수 있도록 한반도 지진 발생 패턴에 따른 지진 발생 취약 지역에 대한 공간적 분포 및 집중도를 공간통계학적 기법을 통해 분석하였으며, KTX 망에서 내진 보강에 대한 우선구간 결정에 대한 과학적이고 합리적인 방안을 제시

하였으며, 지진 발생 시 예상되는 철도시설물의 사고 위험을 사전적으로 예방하기 위한 철도시설물 보강에 있어 지역적(구간) 우선순위를 결정하는데 유용한 자료로 활용될 것으로 기대되며, 본 연구의 결과를 기반으로 향후 전체 철도망 및 교통망에 대한 세밀한 추가분석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 대중교통 계획·운영 효율화 기술개발연구(한국철도기술연구원)의 지원을 받아 수행한 논문임. 이 논문은 2014년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2014S1A5B6038061).

References

- Baddeley, A. and B. Silverman, 1984. A Cautionary Example on the Use of Second-order Methods for Analyzing Point Patterns. *Biometrics*. 40(4): 1089-1093.
- Chuvieco, E. and J. Salas. 1996. Mapping the Spatial Distribution of Forest Fire Danger Using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*. 10(3): 333-345.
- Cressie, N. A. C. 1993. *Statistics for Spatial Data*. (Revised Edition) Wiley: New York.
- Diggle, P. 1983. *Statistical Analysis of Spatial Point Patterns*. London: Academic Press.
- Diggle, P. 1985. A Kernel Method for Smoothing Point Process Data. *Journal of the Royal Statistical Society*. 34(2): 138-147.
- Dixon, P. 2002. Ripley's K-function. El-Shaarawi, A. H. and Piergorsch, W. W. (eds.). *The Encyclopedia of Environmetrics*. New York: John Wiley & Sons Ltd.
- Garcia, V., P. Woodard, S. Titus, W. Adamowicz, and B. Lee. 1995. A Logit Model for Predicting the Daily Occurrence of Human Caused Forest Fires. *International Journal of Wildland Fire*. 5(2): 101-111.
- Getis, A. and J. Franklin. 1987. Second-order Neighborhood Analysis of Mapped Point Patterns. *Ecology*. 68(3): 473-477.
- Kasischke, E., D. Williams, and D. Barry. 2002. Analysis of the Patterns of Large Fires in the Boreal Forest Region of Alaska. *International Journal of Wildland Fire*. 11(2): 131-144.
- Martell, D., S. Otukol, and B. Stocks. 1987. A Logistic Model for Predicting Daily People-caused Forest Fire Occurrence in Ontario. *Canadian Journal of Forest Research*. 17(5): 394-401.
- Pew, K. and C. Larsen. 2001. GIS Analysis of Spatial and Temporal Patterns of Human-caused Wildfires in the Temperate Rain Forest of Vancouver Island, Canada. *Forest Ecology and Management*. 140(1): 1-18.
- Ripley, B. 1976. The Second-order Analysis of Stationary Point Processes. *Journal of Applied Probability*. 13(2): 255-266.
- Schabenberger, O. and C. Gotway. 2005. *Statistical Methods for Spatial Data Analysis*. CRC Press.
- Silverman, B. 1981. Using Kernel Density Estimates to Investigate Multimodality. *Journal of the Royal Statistical Society*. 43(1): 97-99.
- Stone, C. 1984. An Asymptotically Optimal Window Selection Rule for Kernel Density Estimates. *The Annals of Statistics*. 12(4): 1285-1297.
- Yang, J., H. He, S. Shifley, and E. Gustafson. 2007. Spatial Patterns of Modern Period Human-caused Fire Occurrence in the Missouri Ozark Highlands. *Forest Science*. 53(1): 1-15.

Received: Dec. 16, 2015 / Revised: Jan. 25, 2016 / Accepted: Mar. 25, 2016

한반도 지진 발생 취약 지역에 따른 한국고속철도 노선 위험 관리 구간 결정에 대한 연구

국문초록 본 연구에서는 공간통계기법을 이용하여 지진발생의 공간적 발생 및 파급효과를 분석하여 KTX 노선에서 지진발생 위험에 노출되어 있는 구간을 지진의 강도를 고려하여 제시하였다. 지진 발생의 군집성을 파악하기 위해 G, F, K 함수 등과 같은 다양한 함수를 활용하였으며, 남한의 지진 발생 패턴은 군집을 보이고 있는 것으로 판단되었다. 분석 결과 KTX 경부선의 울산-부산구간 52km구간이 지진 위험도가 높아 철도시설물 보강이 필요하며 호남선의 경우 상대적으로 위험도가 낮은 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구결과는 강력한 지진발생시 발생할 수 있는 철도시설물의 사고 위험을 사전적으로 예방하기 위한 지진대비 시설물 보강하는데 있어 지역적(구간) 우선순위를 결정하는데 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대되며 향후 전체 철도망 및 교통망에 대한 추가분석이 필요하다.

주제어 : 내진보강, 지진위험관리, KTX노선, 공간통계

- Profiles
- Jin Ki Eom** : He received his Ph.D. from North Carolina State University. He is a senior researcher of the Transport Systems Research Team at Korea Railroad Research Institute. His research interests include travel behavior, railroad operation, feasibility study and policy. He has published 120 articles in journals and written 3 co-author books(jkom00@krii.re.kr).
- Sun Myeong Jang** : He is a teacher of Sejong Academy Science and Art, and he is in PhD. from the Department of Information and Statistics in Chungbuk National University. His research interests include problem solving about safety issues and mathematical modeling of the movement of the objects(jsm7653@naver.com).
- Yong Un Ban** : He received his M.A. from Yonsei University and Ph.D. from University of Pennsylvania. He is a professor of the Department of Urban Engineering at Chungbuk National University. His research interests included sustainable development, urban spatial configuration, space syntax, eco-industrial park, climate change, and environmental justice. He has published 74 articles in journals and written 5 co-author books(byubyu@chungbuk.ac.kr).
- Tae Young Heo** : He received the B.S. degree in Statistics from the Chungbuk National University and the M.S. and Ph.D degrees in Statistics from the North Carolina State University. Now he is associate professor in department of Information & Statistics, Chungbuk National University. His current research interests include spatial modeling, transportation and environmental statistics based on various spatial methodologies(theo@cbnu.ac.kr).