

# Stochastic Self-similarity Analysis and Visualization of Earthquakes on the Korean Peninsula

JaeMin Hwang<sup>†</sup> · Jiyoung Lim<sup>††</sup> · Hae-Duck J. Jeong<sup>†††</sup>

## ABSTRACT

The Republic of Korea is located far from the boundary of the earthquake plate, and the intra-plate earthquake occurring in these areas is generally small in size and less frequent than the interplate earthquake. Nevertheless, as a result of investigating and analyzing earthquakes that occurred on the Korean Peninsula between the past two years and 1904 and earthquakes that occurred after observing recent earthquakes on the Korean Peninsula, it was found that of a magnitude of 9. In this paper, the Korean Peninsula Historical Earthquake Record (2 years to 1904) published by the National Meteorological Research Institute is used to analyze the relationship between earthquakes on the Korean Peninsula and statistical self-similarity. In addition, the problem solved through this paper was the first to investigate the relationship between earthquake data occurring on the Korean Peninsula and statistical self-similarity. As a result of measuring the degree of self-similarity of earthquakes on the Korean Peninsula using three quantitative estimation methods, the self-similarity parameter  $H$  value ( $0.5 < H < 1$ ) was found to be above 0.8 on average, indicating a high degree of self-similarity. And through graph visualization, it can be easily figured out in which region earthquakes occur most often, and it is expected that it can be used in the development of a prediction system that can predict damage in the event of an earthquake in the future and minimize damage to property and people, as well as in earthquake data analysis and modeling research. Based on the findings of this study, the self-similar process is expected to help understand the patterns and statistical characteristics of seismic activities, group and classify similar seismic events, and be used for prediction of seismic activities, seismic risk assessments, and seismic engineering.

Keywords : Earthquake, Stochastic Self-similarity, Visualization, Self-similar Process, Hurst Parameter

## 한반도에서 발생한 지진의 통계적 자기 유사성 분석 및 시각화

황재민<sup>†</sup> · 임지영<sup>††</sup> · 정해덕<sup>†††</sup>

### 요약

대한민국은 지진 판의 경계로부터 멀리 떨어진 지역에 있으며, 이러한 지역에서 발생하는 판 내부 지진은 판 경계부 지진과 비교하면 일반적으로 규모가 작고 발생빈도도 낮다. 그럼에도 불구하고 과거 2년부터 1904년 사이 한반도에서 발생했던 지진과 최근 한반도 지진을 관측한 이래에 발생한 지진을 조사 및 분석한 결과 진도 규모 9까지 이르는 것으로 나타났다. 본 논문에서는 한반도에서 발생한 지진과 통계적 자기 유사성과의 관계를 분석하기 위해서 국립기상연구소에서 발표한 「한반도 역사지진 기록 (2년~1904년)」을 이용한다. 또한 본 논문을 통해서 해결한 문제는 한반도에서 발생한 지진데이터와 통계적 자기 유사성과 시각화의 관계 연구를 처음으로 규명하였으며, 그 결과 한반도 지진의 자기 유사성 정도를 판단하는 3가지 정량적인 추정방법으로 측정된 결과 자기 유사성 파라미터  $H$  값( $0.5 < H < 1$ )이 0.8이상으로 자기 유사성 정도가 높은 것으로 나타났다. 그리고 그래프의 시각화를 통해 지진이 어느 지역에서 많이 발생했는지를 쉽게 파악할 수 있고, 향후 지진 발생시 피해를 예측하고 재산과 인명 피해를 최소화할 수 있는 예측 시스템 개발과 지진 데이터 분석 및 모델링 연구에 활용될 수 있을 것으로 보인다. 뿐만아니라 본 연구결과를 토대로 자기 유사성 프로세스는 지진활동의 패턴과 통계적 특성을 이해하고, 유사한 지진 사건을 그룹화하고 분류하는데 도움을 줄 수 있으며, 지진 활동에 대한 예측, 지진 위험 평가 및 지진 공학 관련 연구에 활용될 것으로 예상된다.

키워드 : 지진, 통계적 자기 유사성, 시각화, 자기 유사성 프로세스, 허스트 파라미터

### 1. 서론

지진 현상은 지구 내부의 다양한 변화 때문에 일어나는 두

꺼운 암석 판의 운동이나 지구 내부가 역학적으로 균형을 잡기 위하여 돌발적으로 일어나는 지구 내부 물질의 요동 현상이고, 이를 인간에게 비유해 보자면 사회활동을 통하여 여러 가지 요인으로 몸속에 일정 기간 축적된 스트레스를 한순간에 갑자기 발산하는 현상이다[1]. 또한, 예고없이 돌발적으로 일어나는 현상이 아니고 판 구조 운동으로 오랜 기간 스트레스가 축적되면서 한계점에 도달하고 일시에 쌓여있는 에너지가 방출되는 현상이라 설명한다[1].

대한민국에서는 지진이 적게 발생하지만, 지진으로 인한 피

<sup>†</sup> 비회원 : 한국성서대학교 컴퓨터소프트웨어학과 학부생  
<sup>††</sup> 비회원 : 한국성서대학교 컴퓨터소프트웨어학과 교수  
<sup>†††</sup> 정회원 : 한국성서대학교 컴퓨터소프트웨어학과 교수  
Manuscript Received : August 3, 2023  
First Revision : October 20, 2023  
Second Revision : November 6, 2023  
Accepted : November 7, 2023

\* Corresponding Author : Hae-Duck J. Jeong(joshua@bible.ac.kr)

해를 보는 경우가 종종 발생하곤 한다. 예를 들어 대한민국에서 최근 가장 규모가 컸던 9.12 지진을 살펴보고자 한다. 2016년 9월 12일 19시 44분경 경주시 남남서쪽 8.2km 지역(35.77°N, 129.19°E)에서 규모 5.1의 진진이 발생한 이후, 20시 32분경 경주시 남남서쪽 8.7km 지역(35.76°N, 129.19°E)에서 규모 5.8의 본진이 발생하였다. 이는 국내 계기 지진 관측 이래 역대 최대 규모의 지진으로서 전국 대부분 지역에서 진도가 감지되었다[2]. 이 지진으로 인하여 인명피해 6명과 재산피해 4,996건 등 약 35억의 피해를 보았으며, 공공시설은 182건으로 약 58억의 피해를 보았다. 또한, 사유재산의 경우에는 주택전파 5건, 반파 24건, 기와파손 및 벽체균열이 일어난 주택 소파는 4,967건으로 집계되었으며, 문화재의 경우에는 59건으로 약 50억의 피해를 본 것으로 나타났다[2,3].

이 외에도 대한민국에는 크고 작은 규모의 지진이 발생하였는데, 1903년(2년~1904년) 동안 한반도의 역사 지진기록으로부터 추출한 지진 데이터 셋과 최근 지진을 관측을 시작한 1987년 이후로 발생한 지진에 대해 살펴보고자 한다.

### 1.1 지진 데이터 분석 및 시각화를 통해서 해결하고자 하는 문제

본 논문에서는 아직까지 연구되지 않은 한반도에서 발생한 지진데이터와 통계적 자기 유사성과 시각화의 관계 연구를 처음으로 규명한다. 이와 관련하여 지진 데이터 분석과 시각화를 통해 해결하고자 하는 여러 가지 문제가 있을 수 있는데, 몇 가지 주요한 문제는 다음과 같다. (1) 지진 데이터 분석 및 모델링을 통해 향후 지진 발생 시 피해를 예측하고, 대응 전략을 개발하는 것이 중요하다. (2) 지진 데이터를 통해 지진이 환경에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 이는 지진으로 인한 지구 온난화나 지하수 변동과 같은 환경 변화를 이해하는 데 도움이 된다. (3) 지진 데이터를 분석하여 지진 발생을 예측하고 경보 시스템을 개선하는 것이 중요하다. 이를 통해 인명피해를 줄이고 안전한 대피 조치를 취할 수 있다. (4) 지진 데이터 분석은 지진의 영향을 평가하는 데 도움을 줄 수 있다. 이를 통해 건물, 다리, 도로 등의 인프라의 안전성을 평가하고 개선할 수 있다. (5) 국내는 물론 국외 지역에서의 지진 데이터를 분석하여 지진의 지역적 패턴을 이해하는 것이 중요하다. 이는 지진 위험을 예측하고 지진 대응 전략을 개발하는 데 도움이 된다. (6) 지진 데이터를 기반으로 건물과 인프라의 지진 안전성을 평가하고 개선하는 것이 중요한데, 이를 통해 지진 발생 시 재해를 최소화할 수 있다. (7) 지진 데이터 시각화를 활용하여 대중에게 지진 위험에 대한 인식을 높이고, 안전한 행동 및 대피 방법을 교육하는 것이 중요하다.

따라서 이러한 문제들은 한반도에서 발생한 지진의 통계적 자기 유사성 및 시각화 연구를 통해서 지진 관련 데이터를 정량적으로 분석하고 시각화하여 해결할 수 있으며, 지진 예방과 대응을 향상시키는 데 도움이 된다.

### 1.2 지진과 자기 유사성과의 관련 연구

지진과 자기 유사성과의 관련한 최신 연구 동향을 살펴보

면 해외의 경우, 다음과 같이 연구가 진행되고 있으나, 국내 지진을 기반으로 하는 관련 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. Amey et al.[4]은 Von Karman 정규화(Karman regularization)를 이용하여 지진 및/또는 측지 자료를 사용하여 단층 미끄럼의 공간적, 시간적 분포를 결정하는 분석 방법인 미끄럼 역산(Slip inversion)에 자기 유사성 (또는 프랙탈(fractal)) 특성을 통합하는 방법을 제시하였다.

Denolle & Shearer[5]는 '얕은 추력 지진에 대한 자기 유사성에 대한 새로운 관점(New perspectives on self-similarity for shallow thrust earthquakes)' 논문에서 소규모 지진에서 대규모 지진까지 동적 파열 과정의 규모를 조정하는 것은 지진 위험 평가에 매우 중요하며, 이를 연구하기 위해서 지진 규모 5.5 이상의 942개의 추력 지진(thrust earthquakes)의 P파 소스 스펙트럼을 추정한 결과 추력 지진은 자기 유사성이 아니고, 응력 강하 및 확장된 에너지는 순간에 따라 변하지 않음을 확인하였다.

Wang[6]은 지진 단층 규모 조정에 대한 검토 논문에서 지진 단층의 크기 조정은 지진 물리학 뿐만 아니라 지진 위험 평가에도 중요함을 언급하였고, 이에 따라 다양한 단층 매개변수 스케일링(scaling)의 관찰 및 모델링을 검토하였다. 특히 지진의 상수 가정 및 단층의 자기 유사성(self-similarity)을 포함한 9가지 주요 문제들을 검토해야 한다고 제안하였다.

Zakharov[7]는 2011년 3월 11일 일본 지진의 여진에 대한 자기 유사성의 오토리 법칙(Omori law)의 매개변수  $p$ , 구텐베르크-리히터 법칙(Gutenberg-Richter law)의  $b$ , 지진 진앙의 프랙탈 차원(fractal dimension)  $D$ 의 정량적 매개변수를 구하였다. 그 결과 자기 유사성은 시간적, 공간적 척도의 2차수와 지진 규모 크기의 4단위 범위로 나타남을 입증하였다.

Zhan[8]은 심층 지진(deep earthquakes)은 얕은 지진(shallow earthquakes)처럼 행동하지만 근본적으로 다른 물리적 과정을 가져야 하는데, 파열 행동(rupture behaviors), 규모-빈도 통계 및 여진은 다양하며, 슬래브 온도(slab temperature), 깊이 및 규모와 같은 다양한 요인에 불완전하게 의존한다. 심층 지진의 세 가지 주요 메커니즘은 변형 결합(transformational faulting), 탈수 취성(dehydration embrittlement) 및 열 폭주(thermal runaway)의 3가지로 구성하고 있으며, 각각 관측의 일부를 설명할 수 있지만 나머지 부분을 설명하는 데는 잠재적으로 근본적인 어려움을 가지고 있는 것이 현실이다. 이와 관련하여 본 논문에서는 심층 지진은 다양한 단절과 통계적 특성, 자기 유사성 단절을 통해 알 수 있듯이 이중 메커니즘 프로세스(dual-mechanism processes)를 포함할 수 있음을 시사하고 있다.

### 1.3 본 논문의 주요 기여

본 논문은 아직까지 연구되지 않은 한반도에서 발생한 과거 지진 데이터(2년~1904년)와 최근 지진 데이터(1978년~2021년)의 자기 유사성을 통해 지진 활동의 패턴 및 특성을 쉽게 판단할 수 있도록 plotting과 정량적으로 추정하였다.

본 논문에서 제시하는 지진과 자기 유사성과의 관련 연구에 대한 주요 기여는 다음과 같다. 첫째, 지진의 aggregate된 정도에 따라 지진의 분산의 감소하는 정도를 나타내는 variance-time plot 방법, power law 관계를 만족하는 R/S-statistic (rescaled adjusted range) plot 방법과 periodogram-based plot 방법을 이용하여 정량적으로 통계적 자기 유사성을 판단할 수 있는 결과를 제공한다. 둘째, 데이터의 시각화(visualization)를 통해 지진 데이터를 이해하고 발생한 전반적인 지진분포를 빠르게 파악할 수 있다. 셋째, 시각화를 통해 공개 데이터 환경에서 접근성이 높은 데이터로 활용될 것으로 기대된다. 넷째, 향후 지진 위험 평가 및 지진 공학 관련 연구에 대한 패턴과 특성을 파악하고, 예측 및 대비 조치를 취하는데 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

본 논문에서는 수치화된 데이터를 이용하여 지진의 자기 유사성 정도를 판단하는 추정방법으로 부터 정량적 분석과 plot으로 쉽게 판별하여 통계적인 자기 유사성이 있음을 확인하고자 한다[9].

본 논문의 구성은 제2장에서는 통계적 자기 유사성에 대해서 살펴보고, 제3장에서는 한반도 최근 지진과 역사 지진 기록의 dataset에 지진 규모별 어느 지역에서 발생했는지 분석한다. 제4장에서는 한반도 최근 지진과 역사 지진 기록 dataset으로부터 통계적으로 자기 유사성이 얼마나 있는지 정량적 추정방법과 그래프로 분석하고, 끝으로 결론을 짓는다.

## 2. 통계적 자기 유사성

이 논문에서 적용할 자기 유사성(self-similarity)의 수학적인 정의, 성질 및 자기 유사성을 측정하는 도구들에 관하여 알아본다. 자기 유사성은 크게 결정적 자기 유사성(deterministic self-similarity)과 통계적 자기 유사성(stochastic self-similarity)으로 나눌 수 있다. 결정적 자기 유사성은 fractal이라고도 하며, 자기 유사성과 순환성을 포함한다. 그 예로, 고사리의 잎사귀, 해안선, 구름 등이 이에 속한다. 본 논문에서는 통계적 자기 유사성으로 제한하기로 한다. 특히, 시간  $t$ 에 대한 시계열(self-similar time series)에 관하여 다루게 되며, 시간 단위(time unit)의 크기(scale) (예, 초, 분, 시간, 일, 월, 등)가 변화해도 통계적인 측면 (또는 분포면)에서 볼 때, 변화가 없는 속성을 통계적 자기 유사성이라 한다[10].

### 2.1 Self-Similarity의 정의

통계적 자기 유사성은 크게 2가지로 구분할 수 있다. 만약  $Y_c$  와  $c^H Y_t$  (시간 크기(time scale)  $ct$ 를 갖는 rescaled process)이 어떠한 양수 time stretching factor  $c$ 에 대하여 동일한 유한차원 확률(identical finite-dimensional probability)을 갖는다면, self-similarity 파라미터  $H(1/2 < H < 1)$ 를 갖는 strictly self-similar라 한다. 즉, 시간  $t_1, t_2, \dots, t_n$ 로 구성된 수열과  $c > 0$ 에 대하여,  $Y_{ct_1}, Y_{ct_2}, \dots, Y_{ct_n} \stackrel{d}{=} c^H Y_{t_1}, c^H Y_{t_2}, \dots,$

$c^H Y_{t_n}$ 이다(  $\stackrel{d}{=}$  는 분포면에서 동일함을 의미함.)([6-8]. Self-similar 프로세스로부터 얻은 sequence는 시간 간격이 변화하여도 확률 분포관점에서 self-similarity 현상이 뚜렷하게 나타남(burstness; 울퉁불퉁함)을 볼 수 있으나, 그와 반대로 전형적인 Poisson 프로세스로부터 얻은 sequence는 self-similarity의 현상이 나타나고 있지 않음을 보여주고 있다. 다시 말해서 시간 간격이 바뀔 때 따라 burstness함이 없어지고 편평해짐(flatness)을 볼 수 있다.

이러한 확률분포 관점(또는 좁은 의미; narrow sense)에서의 strictly self-similarity는 second-order self-similar 프로세스(또는 넓은 의미(broad sense)의 self-similar 프로세스)와는 사뭇 다르다. 넓은 의미의 self-similarity는 평균, 분산, 그리고 자동상관 함수(auto-correlation function; ACF)에서 나타날 수 있는 반면, 좁은 의미의 self-similarity는 확률분포에서 나타난다.

Weakly continuous-time self-similar 프로세스  $Y_t$ 가 정적 증가(stationary increments) (즉,  $Y_{t_0+t} - Y_{t_0}$ )의 유한차원 확률분포 (finite-dimensional probability distributions)가  $t_0$ 에 의존하지 않음.) 할 때, 어떤 stationary incremental 프로세스  $X = X_i = Y_{i+1} - Y_i : i = 0, 1, 2, \dots$ 를 정의할 수 있다. 즉, 이산시간(discrete-time)의 경우,  $X$ 를 평균  $\mu = E[X]$ , 분산  $\sigma^2 = E[(X - \mu)^2]$ , 그리고 (정규화된) 자동상관함수

$$\rho_k = \frac{E[(X_i - \mu)(X_{i+k} - \mu)]}{\sigma^2}, k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

를 갖는 (이산시간) stationary incremental 프로세스라 가정하자. 이때  $X_{i_1}, X_{i_2}, \dots, X_{i_n}$ 와  $X_{i_1+k}, X_{i_2+k}, \dots, X_{i_n+k}$  프로세스가 동일한 조인트 분포(joint distribution)를 갖는다면, 프로세스  $X$ 는 strictly stationary이다.

그러나, 본 정의에서는 stationarity의 weaker form을 갖는 프로세스, 즉, second-order stationarity (또는 weak, broad, 또는 wide 의미의 stationarity)로 제한한다.

$X^{(m)} = \{ X_k^{(m)}, \dots, k = 1, 2, 3, \dots \}$ 를 구간 평균 (batch means)의 수열, 즉,

$$X_k^{(m)} = \frac{1}{m}(X_{km-m+1} + \dots + X_{km}), k \geq 1 \quad (2)$$

이라 가정하고,  $\{\rho_k^{(m)}\}$ 을  $X^{(m)}$ 의 자동상관함수라고 가정한다.

모든  $m \geq 1$ 에 대하여,

$$\rho_k^{(m)} = \rho_k, k \geq 0 \quad (3)$$

이면, 프로세스  $X$ 는  $1/2 < H < 1$ 를 갖는 exactly second-order self-similar라고 한다. 즉, 프로세스  $X$ 와 aggregated 프로세스  $X^{(m)}, m \geq 1$ 는 동일한 상관구조를 갖는다.

또 충분히 큰 모든 k에 대하여,

$$\rho_k^{(m)} \rightarrow \rho_k, \text{ as } m \rightarrow \infty \quad (4)$$

이면, 프로세스 X는  $1/2 < H < 1$  를 갖는 asymptotically second-order self-similar라고 한다.

Self-similarity에 가장 많이 연구되는 모델은 fractional autoregressive integrated moving-average (F-ARIMA) 프로세스 그룹과 fractional Gaussian noise 프로세스 그룹으로 나누어진다[14]. F-ARIMA(p, d, q) 프로세스는 Hosking[17]에 의하여 제안되었으며, 허스트 파라메터(Hurst parameter)  $H = d + 1/2$ ,  $0 < d < 1/2$ 를 갖는 asymptotically self-similar 이고, p는 ARIMA 프로세스에서 자동회귀의 차수이고, q는 moving average의 차수이다. 후자 그룹인 FGN 프로세스는 incremental process  $\{Y_k\} = \{X_k - X_{k-1}\}$ ,  $k \geq 0$  를 의미 하고,  $\{X_k\}$ 는 fractional Brownian motion (FBM) 랜덤 프로세스를 나타내고 있다. 이 프로세스는 평균  $\mu$ , 분산  $\sigma^2$ 과

$$\rho_k = 1/2 (|k+1|^{2H} - 2|k|^{2H} + |k-1|^{2H}), k > 0 \quad (5)$$

를 갖는 (discrete-time) stationary Gaussian 프로세스이다[11-13]. 다음은 self-similar 프로세스의 성질에 관하여 살펴본다.

2.2 Self-Similar 프로세스의 성질

Self-similar 프로세스는 다음과 같은 주요 성질들을 갖고 있다[11, 14].

Long-range dependence: 어떤 프로세스  $\{X_k\}$ 에서 그 ACF  $\rho_k$ 이 non-summable하면, 즉,  $\sum_{k=0}^{\infty} \rho_k = \infty$ , long-range dependence (LRD)를 갖는 stationary 프로세스라고 부른다. ACF를 그래프로 나타내면, ACF 곡선의 감소 속도는 지수분포보다 완만한 쌍곡선 모양을 그린다. 또 다른 LRD의 정의는

$$\rho_k \sim L(t)k^{-(2-2H)}, \text{ as } k \rightarrow \infty \quad (6)$$

로 표현되는데,  $1/2 < H < 1$  이고,  $L(\cdot)$ 는 모든  $x > 0$ 에 대하여  $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{L(xt)}{L(t)} = 1$  를 나타낸다. 허스트 파라메터 H는 자동상관함수의 꼬리부분의 형태로 표현되는 Equation (6)의 관계로 표현된다.

Slowly decaying variance : 표본 평균의 분산은 non-overlapping batch size m의 반비보다 천천히 감소한다. 즉,

$$Var[X_k^{(m)}] \rightarrow c_1 m^{-\beta_1}, \text{ as } m \rightarrow \infty \quad (7)$$

이다. 여기서  $c_1$ 는 상수이고,  $0 < \beta_1 < 1$ .

Hurst effect : Self-similar 프로세스는 역사적으로 상관도가 높은 실험 데이터를 정확한 표현과 해석을 하는데 큰 기여를 해 왔다. 즉, 확률변수  $X = X_{t=1}^n = X_1, X_2, \dots, X_n$  와 같이 주어진 시계열에 대하여, 소위 rescaled adjusted range  $R(t, m)/S(t, m)$  (또는 R/S-statistic)라 불리는 Equation (8)을 고려할 수 있다.

$$R(t, m) = \max_i [N_{t+i} - N_t - \frac{i}{m}(N_{t+m} - N_t), 0 \leq i \leq m] - \min_i [N_{t+i} - N_t - \frac{i}{m}(N_{t+m} - N_t), 0 \leq i \leq m] \quad (8)$$

여기서  $1 \leq t \leq n$ , m은 batch size이고,  $N_t = \sum_{i=1}^t X_i$ 이다.

그리고

$$S(t, m) = \sqrt{m^{-1} \sum_{i=t+1}^{t+m} (X_i - \overline{X_{t,m}})^2} \quad (9)$$

여기서  $\overline{X_{t,m}} = m^{-1} \sum_{i=t+1}^{t+m} X_i$ .

자연환경에서 관찰된 수많은 시계열(time series)에 대하여, Hurst는  $R(t, m)/S(t, m)$ 의 기대치가 점진적으로 power-law 관계를 만족한다는 사실을 실험적으로 Equation (10)을 이용하여 증명했다.

$$E[\frac{R(t, m)}{S(t, m)}] \rightarrow c_2 m^H, \text{ as } m \rightarrow \infty,$$

$$\text{with } 1/2 < H < 1 \quad (10)$$

여기서  $c_2$ 는 유한 양의 정수이다 [14]. 이러한 실험적 발견은 Markovian과 관련 프로세스에 대하여 이전에 알려진 결과들과는 대조적이다. SRD(Short Range Dependence)를 갖는 stationary 프로세스에 대하여,  $E[R(t, m)/S(t, m)]$ 는  $m^{1/2}$ 와 같이 점진적으로 나타난다. 그러므로 값이 큰 m 대하여, R/S-statistic plot은 경사가 1/2 직선 주위에 임의로 흩어지게 된다. 나일강 데이터, 다른 많은 수문학, 지구물리학, 그리고 기후학 데이터에 대한 Hurst의 발견은 Hurst 효과(Hurst effect)로 알려져 있으며, H를 허스트 파라메터(또는 self-similarity 파라메터)라 부른다. 즉,  $R(t, m)/S(t, m)$ 의 plot은 경사가  $1/2 < H < 1$ 인 직선주위에 점들이 임의로 흩어지게 된다. Mandelbrot와 Wallis는 Hurst 효과(Hurst effect)는 허스트 파라메터가  $1/2 < H < 1$ 인 FGN에 의해서 표현될 수 있다고 하였다[11].

1/f-noise : spectral density  $f(\lambda, H)$ 는 원점근처에서 power law를 따른다. 즉,

$$f(\lambda, H) \rightarrow c_3 \lambda^{1-2H}, \text{ as } \lambda \rightarrow 0 \quad (11)$$

이고,  $c_3$ 는 유한 양의 정수이고,  $1/2 < H < 1$ 이다.

2.3 지진의 추정방법

본 논문에서 사용되는 허스트 파라메터 H의 범위는  $1/2 < H < 1$  이며, 허스트 파라메터가 1에 가까워 질수록 자기 유사성 정도가 높은 것을 의미한다. 자기 유사성 특성을 분석하기 위해서는 자기 유사성 모델의 파라메터인 허스트 파라메터 값을 구하면 된다. 이와 같은 지진의 자기 유사성 정도를 판단하는 방법은 대략적인 경향을 보여주는 방법과 점 추정법(point estimator)으로 나눌 수 있다. 경향을 보여주는 방법에는 간단하게 자기 유사성을 판단 할 수 있다는 장점이 있지만, 정확도가 떨어진다는 단점이 있다[12,13].

대표적인 방법으로 지진의 aggregate된 정도에 따라 지진의 분산의 감소하는 정도를 나타내는 variance-time plot 방법과 power law관계를 만족하는 R/S-statistic (rescaled adjusted range) plot 방법(Hurst effect 참조), periodogram-based plot 방법 등이 있다[11,14,15].

1) Variance-Time Plot

Variance-time plot은 관찰하고자 하는 데이터의 자기 유사성을 그래프로 나타내는 방법으로써 시계열  $X(m)$ 에서 큰 값  $m$ 에 대한  $X(m)$ 의 분산  $Var(X^{(m)})$ 값의 분포를 log-log plot에 대한 기울기를 말한다. 이 plot에 그려지는 분포의 대략적인 기울기를  $\beta$ 라고 하면, H는  $H = 1 - \beta/2$ 를 만족하며, 이렇게 구한 H가  $1/2 < H < 1$ 을 만족하면  $X(m)$ 은 상수 H에 의한 자기 유사성을 갖는다고 할 수 있다.

좀더 자세히 설명하면, m개의 데이터를 하나로 묶어서 그 묶음(aggregation)의 평균값의 확률 과정(random process)을  $X^{(m)} = \{X_k^{(m)}, \dots, k=1,2,3,\dots\}$ 라고 하면, 이때  $X_k^{(m)}$ 은 Equation (2)이 되고,  $X(m)$ 의 분산들은 Equation (12)와 같이 정의된다.

$$Var(X^{(m)}) = \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k (X_j^{(m)} - \overline{X^{(m)}})^2 \quad (12)$$

만약 이 확률과정이 자기 유사성을 갖는다면, 위의 식에서 나온 분산들은 다음과 같은 Equation (13)을 만족한다.

$$Var(X^{(m)}) \sim \frac{Var(X)}{m^\beta} \quad (13)$$

Equation (13)의 양변에 log를 취하면

$$\log(Var(X^{(m)})) \sim \log(Var(X)) - \beta \log(m) \quad (14)$$

이때  $\beta$  값은 허스트 파라메터와 Equation (15)와 같은 일차 함수의 관계를 갖게 된다.

$$H = 1 - \beta/2 \quad (15)$$

$\log[Var(X)]$  는 m에 독립적인 상수이기 때문에 log-log plot에서  $\log[Var(X^{(m)})]$  과 m을 나타내면  $-\beta$ 의 기울기를 가지는 직선이 나오게 된다. 이 기울기 값이 -1과 0 사이

를 나타내면 자기 유사성 특성을 가지는 것이다.  $\beta$  값을 이용해서 허스트 파라메터 값을 구할 수 있다.  $\beta$  값이 0에 가까워질수록 자기 유사성 정도가 높은 것을 의미한다.

2) R/S-Statistic Plot

시계열  $X(m)$ 을 R/S값으로 크기 변환(rescale)한 것을 m에 대하여 log-log plot으로 나타낸 plot을 말한다. 여기서 R과 S는 Hurst effect의 Equation (8)과 Equation (9)로부터 얻는다. 이때, log-log plot에 나타난 그래프의 기울기 값이 H가 되며, H가  $1/2 < H < 1$ 을 만족하면  $X(m)$ 은 상수 H에 의한 자기 유사성을 갖는다고 할 수 있다[16].

자기 유사성을 가진 지진인 경우 N이 충분히 큰 경우 Equation (16)과 같은 특성을 나타낸다.

$$R/S \sim (N/2)^H, H > 1/2 \quad (16)$$

$$\log[R/S] \sim H \log(N) - H \log(2)$$

$\log[R/S]$  와 N을 log-log plot으로 나타내면, 기울기가 H를 갖는 직선이 나오게 된다.

3) Periodogram Plot

주기에 따른 periodogram을 log-log plot에 나타낸 것을 말하며, periodogram은 다음의 식을 이용하여 구한다.

$$P_N(\lambda) = \frac{1}{2\pi N} \left| \sum_{j=1}^N X_j e^{ij\lambda} \right|^2 \quad (17)$$

여기서  $\lambda$ 는 주기, N은 시계열의 개수를 의미한다. log-log plot에 나타나는 분포의 대략적인 기울기를  $\beta$ 라고 한다면, H는  $H = 1 - \beta/2$ 를 만족하며, 이렇게 구한 H가  $1/2 < H < 1$ 을 만족하면  $X(m)$ 은 상수 H에 의한 자기 유사성을 갖는다고 할 수 있다.

좀더 자세히 살펴보면, periodogram plot은 주파수가 0으로 가까워 질 때, power spectrum의 기울기를 사용하는 방법으로  $X_0, X_1, \dots, X_{k-1}$ 가 이산 시간으로 얻은 k개의 샘플 일 때, 이 시계열의 DFT (Discrete Fourier Transform)은 Equation (18)과 같다.

$$\hat{x}_k(\lambda) = \sum_{j=0}^{k-1} X_j e^{-2\pi i j \lambda} \quad (18)$$

Equation (19)와 같이,  $x_k(\lambda)$ 의 크기를 제공한 것은 주파수  $\lambda$ 에서의 에너지를 나타내게 되며, 만약 이 에너지를 전체 시간 k로 나누면, 주파수  $\lambda$ 에서 power의 추정 값을 얻게 된다.

$$\hat{P}_k = \frac{1}{k} |x_k(\lambda)|^2 \quad (19)$$

위의 식을 다시 표현하면, Equation (20)과 같다.

$$P_N(\lambda) = \frac{1}{2\pi N} \left| \sum_{j=1}^N x_j e^{ij\lambda} \right| \quad (20)$$

Equation (20)을 periodogram 또는 intensity 함수라고 하며, 이 식을 이용하여 PSD의 추정값을 구한다. 자기 유사성을 가진 지진의 특성 중 앞에서 설명한 PSD의 특성을 사용하면 Equation (21)과 같이 되며,

$$f(\lambda) \sim \frac{1}{|\lambda|^\gamma}, \text{ as } \lambda \rightarrow 0, 0 < \gamma < 1 \quad (21)$$

$$\log [f(\lambda)] \sim -\gamma \log [|\lambda|]$$

이때  $\log [f(\lambda)]$  와  $\lambda$ 의 log-log plot을 그리면 기울기가  $-\gamma$ 인 직선이 나오며, 이것은 앞의 허스트 파라메터와 Equation (22)과 같은 관계를 갖는다.

$$-\gamma = \beta - 1 = 1 - 2\hat{H} \quad (22)$$

$$\hat{H} = \frac{2 - \beta}{2}$$

본 논문에서는 자기 유사성의 특성과 지진과 연계하여 살펴보기로 한다.

### 3. 한반도 최근 지진 및 역사 지진 기록

본 장에서는 최근 지진 및 역사 지진 기록의 dataset들을 분석하기 위해 데이터 처리, 통계계산 및 분석, 그리고 그래픽스에 탁월한 Matlab와 R 프로그래밍 언어를 사용한다. 분석 과정에서 Matlab으로 통계적인 자기 유사성 정도를 판단하기 위해서 추정방법을 구현하고, R 프로그래밍으로는 다양한 그래프를 그림으로써 시각화 자료로 제시한다. 'leaflet' 라이브러리를 사용하여 지도를 Viewer에 보여주는 역할을 담당하며, 기상청에서 발생한 지진을 설명하는 자료 중 함께 제공하는 위도와 경도를 이용하여 지도상에 나타내어 보다 효과적인 시각화 자료로 제시하고자 한다[9].

#### 3.1 최근 지진 발생

지진을 관측한 1978년부터 2021년까지 대한민국에서만 발생한 지진 횟수를 살펴보면 Fig. 1과 같다[17].

기상청에서 제공한 “지진 및 지진해일 발생통계”에 따르면 지진이 다른 해에 비해 많이 발생한 2016년~2018년을 제외하면 평균적으로 50회 미만으로 발생하고 있음을 Fig. 1에서 확인할 수 있다.

지진은 규모에 따라 나눌 수 있는데, 기상청에서 제공하고 있는 자료에 따르면 기상청에서는 지진의규모(ML)에 따라  $2 \leq ML < 3$ ,  $3 \leq ML < 4$ ,  $4 \leq ML < 5$ ,  $5 \leq ML$ 로 나누고 있다.

지진의 규모대로 지진을 분류한다면 다음과 같이 분류할 수 있다. 예를 들어 서론에서 소개한 9.12 지진들을 지진의 규모대로 분류한다면  $5 \leq ML$ 에 해당한다. 이와 같은 방법으로 1978년부터 2021년도 사이에 발생한 지진들을 지진의 규모대로 분류하고자 한다.

대한민국은 판의 경계로부터 많이 떨어져 있지만, 그럼에도 불구하고 지진은 자주 발생한 것을 Fig. 2를 통해 확인할 수 있다.

규모가 2 이상 3 미만(이하, ML 표기)인 지진은 총 1,162회가 발생하였으며,  $3 \leq ML < 4$ 에 해당하는 지진은 160회,  $4 \leq ML < 5$ 에 해당하는 지진은 19회, 그리고 지진의 규모가 5 이상인 지진은 총 7회 발생하였다[17].

서론에서 소개한 바와 같이 2016년에 발생한 경주 9.12 지진처럼 2000년대 이후로 지진의 규모가 5 이상인 지진은 총 7회 발생하였다. 판의 경계로부터 멀어졌지만, 어떻게 대한민국에서 규모 5 이상의 지진이 발생하였는지는 알 수 없다. 하지만, 규모 5.0 이상의 지진에 대해 규모가 큰 순서대로 분석하고자 한다.

가장 규모가 컸던 지진은 경주에서 발생한 5.8 규모의 지진이다. 2016년 9월 12일에 발생하였다. 두 번째는 경북 포항시 북구 북쪽 8km 지역에서 규모 5.4의 지진이다. 이는 2017년 11월 15일에 발생하였으며, 9.12 지진과 비교하면 다음과 같이 비교할 수 있다. 진도 V 이상 지역은 포항지진의

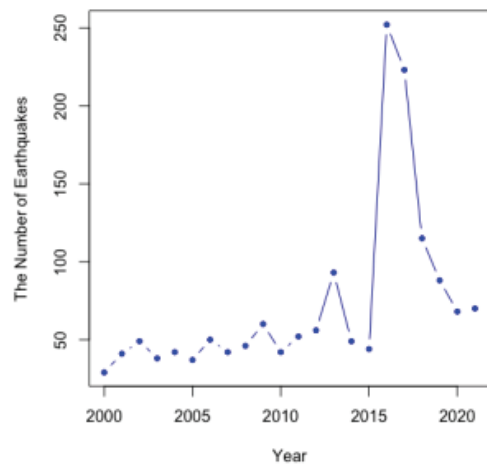


Fig. 1. Number of Earthquakes by Year of Recent Earthquakes (1978-2021)

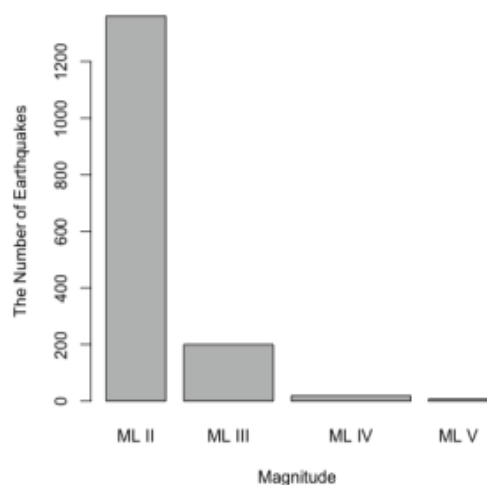


Fig. 2. Classification According to Magnitude of Recent Earthquakes (1978-2021)

경우 반경 약 15km 이내에 분포하며, 9.12 지진은 반경 약 30km 범위에 분포하여 포항지진이 9.12 지진보다 좁은 범위에 피해가 집중된 것을 확인할 수 있었으며, 9.12 지진은 5천 건 이상의 피해신고 중 진도 Ⅷ인 지점이 7 지점이지만 (기상청, 2017), 포항지진의 경우 약 2만 건의 피해신고 중 총 337지점이 진도 Ⅷ로 평가되었다. 즉, 포항지진이 9.12 지진보다 더 좁은 범위에서 큰 피해를 발생시켰다[18].

세 번째는 2004년 5월 29일, 경북 울진군 동남동쪽 74km 해역에서 발생한 규모 5.2의 지진이다. 울진 해상에서 발생한 지진이었기에 대한민국에 직접적인 피해가 발생하지 않았으나 이후로도 약한 여진이 발생하였다[19].

이후로는 2016년 9월 12일 경북 경주시 남남서쪽 8.2km 지역에서 발생한 5.1 규모의 지진(이후 9.12라 칭함), 2014년 4월 1일 충남 태안군 서격렬비도 서북서쪽 100km 해역에서 발생한 5.1 규모의 지진, 2016년 7월 5일 울산 동구 동쪽 52km 해역에서 발생한 5.0 규모의 지진, 2003년 3월 30일 인천 백령도 서남서쪽 88km 해역에서 발생한 5.0 규모의 지진이 발생하였다[20].

Fig. 3을 보면, 규모의 크기가 컸던 9.12 지진과 포항지진 이외에는 해상에서 일어났음을 볼 수 있다. 그렇기에 대한민



Fig. 3. Visualization of Earthquakes with a Magnitude of 5.0 or Higher During Recent Earthquakes (2000–2021)

국에서도 지진의 진동을 느낄 수는 있었지만, 9.12 지진과 포항지진처럼 큰 피해를 주지 않았다.

### 3.2 한반도 역사 지진기록

지금부터는 1987년 이전에 발생한 지진에 대하여 분석해 보고자 한다. 분석은 이전 단계와 같이 분석하며, 이를 통해 어느 지역에서 지진이 자주 일어났는지를 확인해보고자 한다.

한반도의 역사 지진기록을 살펴보기 위해 국립기상연구소에서 발표한 「한반도 역사지진 기록 (2년~1904년)」을 이용하였다[21,22]. 「한반도 역사지진 기록 (2년~1904년)」에 따르면 2년부터 1904년 사이에는 한반도에 2,178회의 지진이 발생하였다고 밝혔다. 따라서, 총 2,178회의 지진을 진도에 따라 분류하여 분석해보고자 한다.

진도 분류는 다음과 같은 단계를 거쳐 데이터를 추출하였다. 예를 들어 지진의 규모(ML)가 II인 경우에는 ‘ML II’ 카테고리에 포함되도록 하였으며, II-IV인 경우에는 진도의 크기가 가장 큰 ‘ML IV’ 카테고리에 포함되도록 하여 결과를 나타내었다.

위에서 설명한 분류 방법을 토대로 분류한 결과 Fig. 4를 통해 볼 수 있듯이 ML IV의 지진은 1,724회, ML V의 지진은 327회가 발생하였다. 또한, ML VI의 지진은 60회, ML VII의 지진은 27회, ML VIII의 지진은 20회, ML IX의 지진은 15회가 발생하였다. 총 2,178회의 지진기록 중에서 11개는 진도의 크기를 알 수 없다고 표시되어 있어 데이터에서 제외하여 분석하였다.

지진규모의 크기가 4인 지진부터 분석해보고자 한다. 지진 규모의 크기가 4인 지진이 처음 발생한 때는 1025년 5월 19/顯宗(음력. 16. 4. 20.(辛未))에 발생하였고, ‘영남도(嶺南道) 광평(廣平 - 경북 성주), 하빈(河濱 - 대구) 등 10개 현에 지진이 있었고 壬申, 乙亥에도 지진이 있었다(2a,2c,4,5).’라는 기사(출전) 기록으로 남아있다. 이 위치(위도 35.9°, 경도 128.4°)는 현재의 경상북도 성주군 선남면 도흥리다.

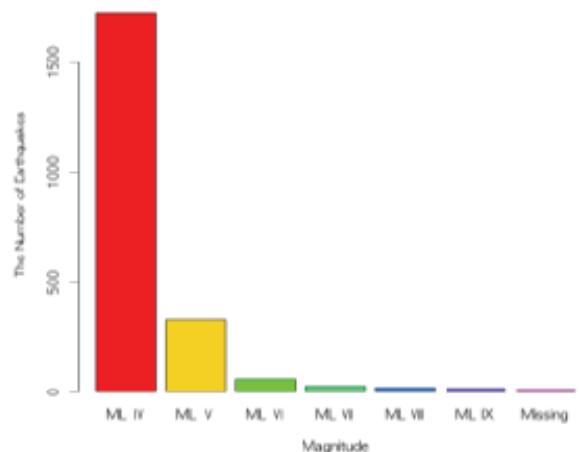


Fig. 4. The Number of Occurrences by Magnitude of Past Earthquakes (「Records of Historical Earthquakes on the Korean Peninsula (2 years to 1904)」)

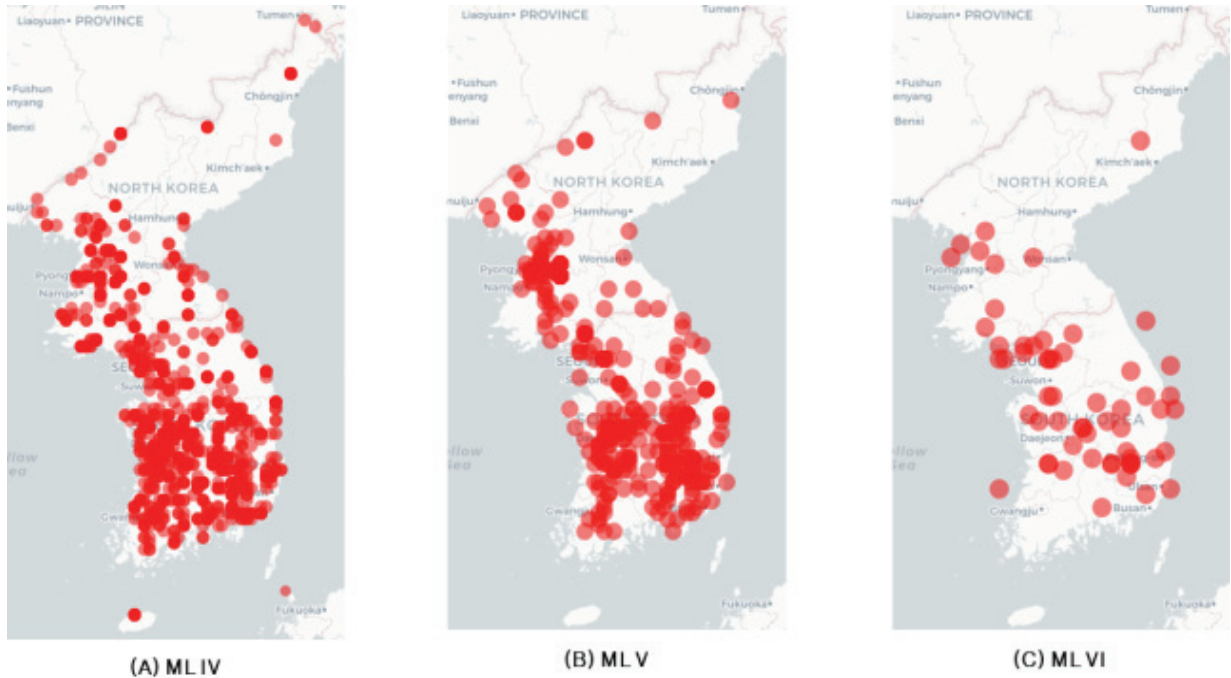


Fig. 5. Visualization of Occurrence Areas of ML IV to ML VI  
 (『Records of Historical Earthquakes in the Korean Peninsula (Year 2-1904)』)

이 외에도 많은 지역에서 ML IV의 크기를 갖는 지진이 발생했음을 Fig. 5A를 통해 확인할 수 있다. Fig. 5A를 분석하면 강원도, 경기도, 서울특별시, 또는 북한의 전 지역보다는 전라도와 경상도에 많은 지진이 발생하였음을 확인할 수 있다.

지진규모의 크기가 5인 지진은 규모 크기가 4인 지진이 처음 발생한 때와 같은 연도에 발생하였다. 1025년 8월 3일/顯宗(음력. 16. 7. 7.(丁亥))에 발생하였으며, '경주, 상주, 안동, 밀성(密城 - 밀양)과 청주(淸州) 등지에 지진이 있었다(2a,2c, 4,5).'라는 기사(출전) 기록으로 남아있다. 이 위치(위도 36.2°, 경도 128.5°)는 현재의 경상북도 군위군 소보면 평호리이다.

지진규모의 크기가 4인 지진이 발생한 지역 Fig. 5A과 지진규모의 크기가 5인 지진이 발생한 지역 Fig. 5B를 보았을 때, 지진규모의 크기가 5인 지진이 발생한 지역이 더욱 집중적으로 전라도와 경상도에서 발생함을 확인할 수 있다. 또한, 평양 근처에서 많이 발생하였음을 볼 수 있다.

지진규모의 크기가 6인 지진이 처음 발생한 때는 1404년 2월 9일/太宗(음력. 3. 12. 28(辛丑))에 발생하였으며, '강릉부(江陵府)에서 지진(地震)하였는데, 원주(原州)까지 이르렀다(3).'라는 기사(출전) 기록으로 남아있다. 이 위치(위도 37.7°, 경도 128.8°)는 현재의 강원도 강릉시 성산면 오봉리이다.

지진규모의 크기가 6인 지진은 지진규모의 크기가 4 또는 5인 지진이 발생한 횟수보다 현저히 차이가 난다는 사실을 (Fig. 5C)을 통해 확인할 수 있다. 그렇지만 경상도와 평양 일대에는 계속해서 큰 지진이 집중적으로 발생하였음을 확인할 수 있다.

지진규모의 크기가 7인 지진이 처음 발생한 때는 1226년

10월 29일/高宗(음력. 13. 10. 7(己丑))에 발생하였고, '지진이 있어서 지붕 기왓장이 다 떨어졌다(2a,2c,4,5). (개성) 추정'이라는 기사(출전) 기록으로 남아있다. 이 위치(위도 38°, 경도 126.6°)는 현재의 조선민주주의인민공화국 황해북도 개성이다(Fig. 6A 참조).

지진규모의 크기가 8인 지진이 처음 발생한 때는 27년 10월 -/百濟(음력. 45. 10. -(溫祚))에 발생하였으며, '10월에는 지진이 있어서 人家(인가)가 무너졌다(1, 5). (한성:서울-풍납/몽촌토성) 추정'이라는 기사(출전) 기록으로 남아있다. 이 위치(위도 37.5°, 경도 127.1°)는 현재의 서울특별시 송파구 석촌동 229-3이다(Fig. 6B 참조). 지진규모의 세기가 작을 때에도, 또는 지진규모의 세기가 클 때에도 거의 유사하게 경상도 지역과 평양 지역에서 지진이 자주 발생하였음을 Fig. 5B 과 Fig. 6B를 통해 확인할 수 있다.

마지막으로 지진규모의 크기가 9인 지진이 처음 발생한 때는 89년 6월 -/百濟(음력. 13. 6. -(己婁))에 발생하였으며, '지진이 있어 民家(민가)가 무너지니 죽은 자가 많았다(1, 5). (한성:서울-풍납/몽촌토성, 위도 37.5°, 경도 127.1) 추정'이라는 기사(출전) 기록으로 남아있다(Fig. 6C 참조).

한반도 역사 지진기록을 살펴보면 Fig. 5 ~ Fig. 6까지 평균적으로 비슷한 결과를 보인다. 경상도, 특히 울산지역 근처에서 규모가 크고 작은 지진이 자주 발생하였으며, 개성과 같은 평양 지역에서도 같이 자주 발생했음을 확인할 수 있다. 대한민국 내에서 발생한 지진기록을 살펴본다면, 2년부터 1904년까지 발생한 지진이 통상적으로 발생한 경상도 지역이, 최근 들어서도 크고 작은 지진이 계속해서 발생함을 확인할 수 있다.



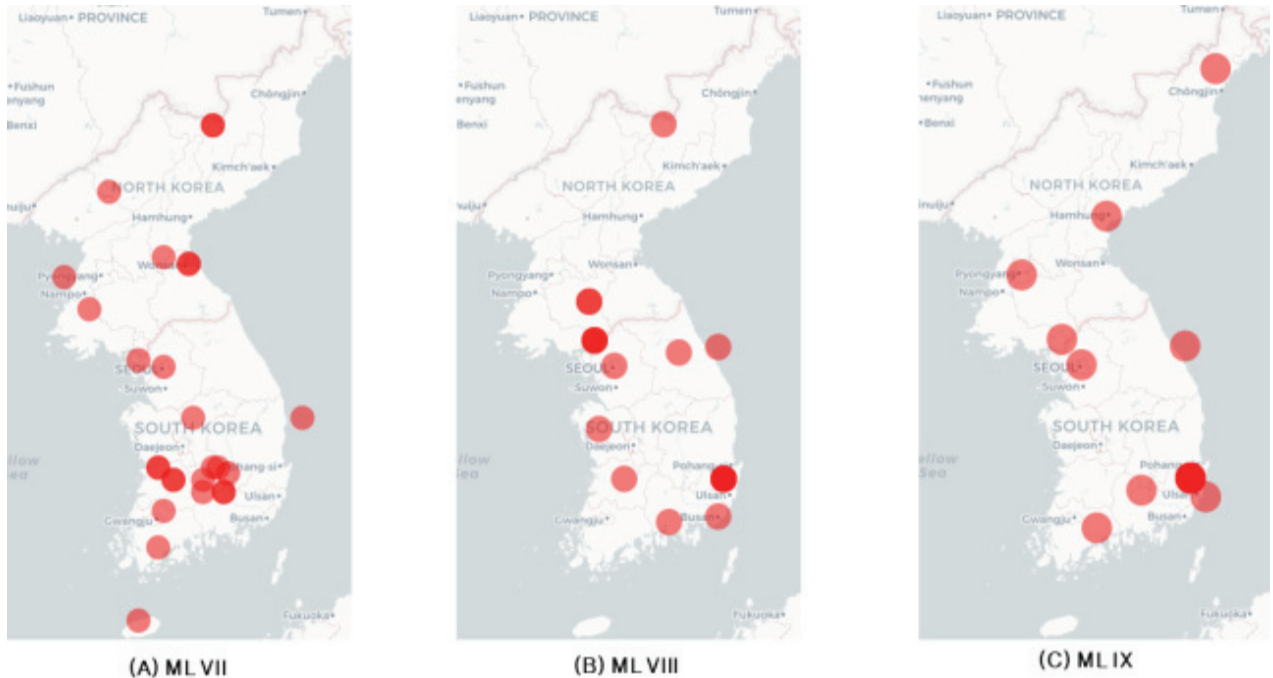


Fig. 6. Visualization of Occurrence Areas of ML VII to ML IX  
 (“Records of Historical Earthquakes in the Korean Peninsula (Year 2~1904).”)

#### 4. 지진의 자기 유사성 분석

Fig. 7과 Fig. 8는 최근 한반도의 지진 및 역사 지진 기록의 datasets에 대한 sequence plot과 histogram을 나타내고 있다. 진도의 크기가 역사 기록의 dataset에서 규모 9도가 15회나 발생했음을 보여주고 있다. 또한 Fig. 9, Fig. 10과 Fig. 11은 R/S-statistic plot, Variance-time plot 및 Periodogram plot을 각각 나타내고 있다. 그리고 Table 1의 허스트 파라미터 값은 R/S-statistic plot, Variance-time plot 및 Periodogram plot으로부터 얻어진 Hurst parameter 결과이다. Table 1의 허스트 파라미터  $H$ 의 범위는  $1/2 < H < 1$ 에 있으며, 허스트 파라미터가 1에 가까워질수록 자기 유사성 정도가 높은 것을 의미한다. Variance-time plot에서 추정량 0.8061로 허스트 파라미터 값이 가장 높았으며, 역사 지진 기록의 dataset으로부터 R/S-statistic plot에서 0.8098로 가장 높은 허스트 파라미터 값을 보여주고 있다. Periodogram plot으로부터 보다 낮은 것으로 나타났다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 아직까지 연구되지 않은 한반도에서 발생한 지진데이터를 통계적 자기 유사성과 시각화를 통해 분석해보았다. 2년부터 1904년 사이에 발생한 지진을 규모별로 나누어 분석하였으며, 이를 Matlab과 R에서 제공하는 leaflet 라이브러리를 이용하여 시각화를 나타내었다. 이를 통해 알 수 있

었던 것은 지진이 이전부터 많은 기간에 걸쳐 한반도에 발생했다는 것과 경상도와 평양 일대에 주로 중점적으로 발생했음을 확인하였다.

또한, 1978년도 부터 2021년까지 발생한 지진에 대해 분석하였으며, 이를 통해 과거에 발생한 지진과 비슷한 지역에서 지진이 자주 발생하고 있음을 확인하였다.

Matlab과 R에서 제공하는 plot을 통해 시각적으로 볼 수 있는 자료를 만들어 한눈에 이해할 수 있도록, 또는 정보를 효과적으로 전달될 수 있도록 하여 분석에 쉽게 사용할 수 있었다. 또한, R에서 제공하는 leaflet 라이브러리를 이용하여 지진의 규모에 따라 지진의 발생 지점을 나타내어 어느 지점에서 지진이 자주 발생하는지, 그리고 시각화를 통하여 그때 지진의 규모가 어느 정도인지를 한눈에 확인할 수 있었다.

또한 한반도에서 발생한 최근 지진과 역사 지진기록의 dataset으로 자기 유사성 정도를 정량적으로 분석하였을 때, 자기 유사성 파라미터 (허스트 파라미터)의 범위는  $0.5 < H < 1$  사이에 있으며, RS-statistic plot과 Variance-time plot으로부터 추정량 0.8이상으로 나타나 자기 유사성 정도가 높은 것으로 나타났고, 한반도의 지진은 자기 유사성 정도를 판단하는 정량적인 추정방법과 그래프의 시각화를 통해 통계적으로 자기 유사성이 있음을 확인하였다. 따라서 자기 유사성 프로세스(self-similar process)는 지진 활동의 통계적 특성을 이해하고, 유사한 지진 사건을 그룹화하고 분류하는데 도움을 줄 수 있을 뿐만 아니라 지진 활동의 예측, 지진 위험 평가 및 지진 공학 등의 지진 관련 연구에도 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

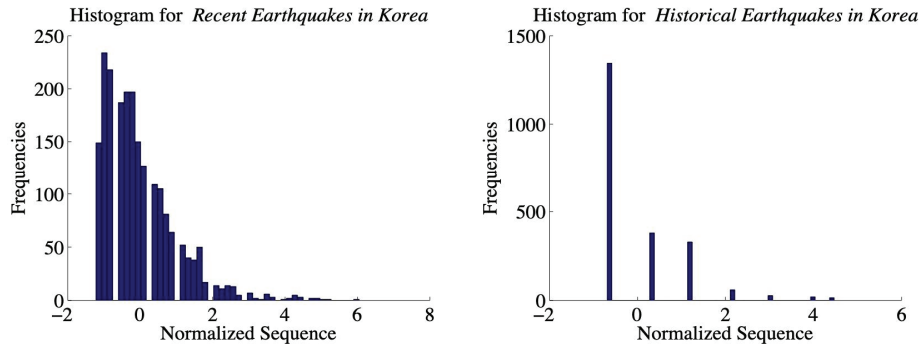


Fig. 7. Two Histograms of Recent and Historical Earthquake Records (Records of Historical Earthquakes in the Korean Peninsula (Year 2~1904))

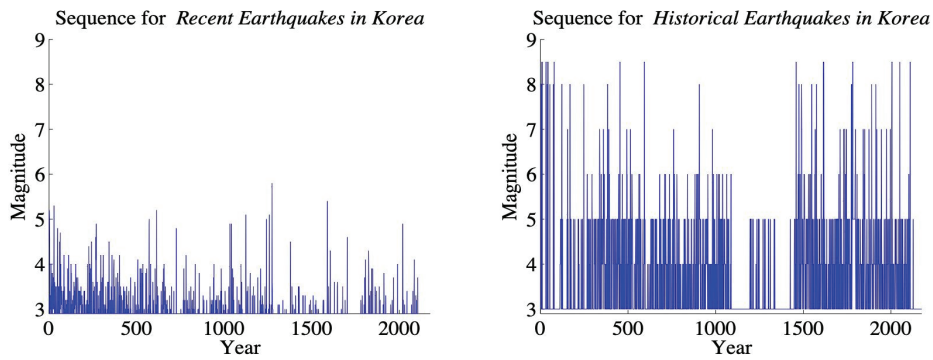


Fig. 8. Sequence Plots for Datasets of Recent and Historical Earthquake Records (Records of historical earthquakes in the Korean Peninsula (Year 2~1904))

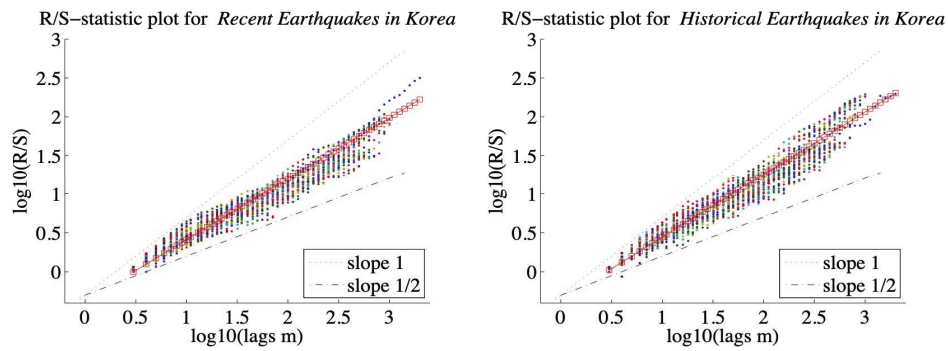


Fig. 9. RS Statistic Plots of Recent Earthquakes and Historical Earthquake Records (Records of Historical Earthquakes in the Korean Peninsula (Year 2~1904))

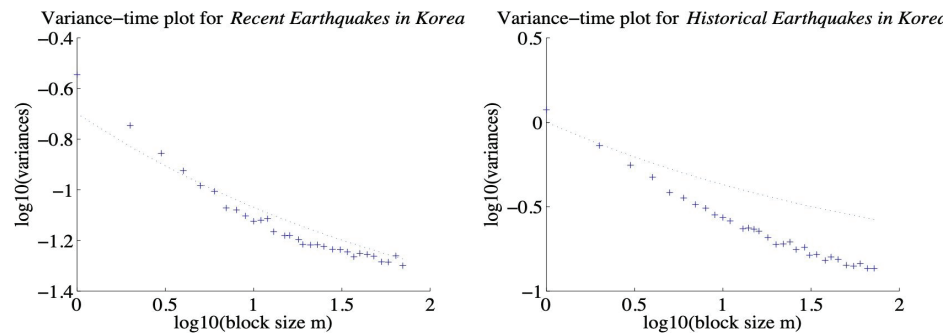


Fig. 10. Variance-time Plots of Recent Earthquakes and Historical Earthquake Records (Records of Historical Earthquakes in the Korean Peninsula (Year 2~1904))

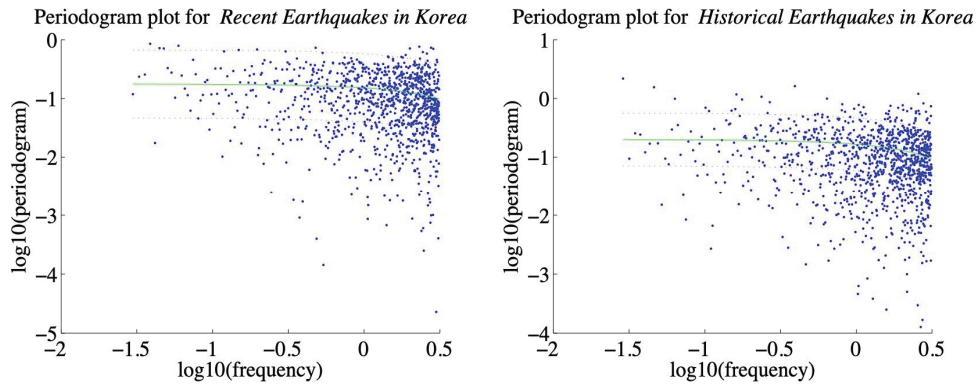


Fig. 11. Periodogram Plots of Recent Earthquakes and Historical Earthquake Records (Records of Historical Earthquakes in the Korean Peninsula (Year 2~1904).)

Table 1. Experimental results

| Estimation Methods           | Recent Earthquakes (Year 1978~2021) | Historical Earthquake Records (Year 2~1904) |
|------------------------------|-------------------------------------|---|
| Maximum Earthquake Magnitude | 5.8                                 | 9   |
| Average Earthquake Magnitude | 2.6112                              | 3.6932                                      |
| Number of Earthquakes        | 2,109                               | 2,176                                       |
| RS-statistic Plot            | 0.7879                              | 0.8098                                      |
| Variance-time Plot           | 0.8061                              | 0.7511                                      |
| Periodogram Plot             | 0.6982                              | 0.6847                                      |

## 6. 이해갈등관계 명시

저자는 기업으로부터의 재정적 지원 또는 연계, 이익집단으로부터의 정치적 압력 등과 같은 이해갈등관계가 없으며, 본 연구에 관계된 연구 지원금을 받은 사실이 없습니다.

## References

- [1] J.-G. Kim, "About the causes of earthquakes and tsunamis," *Magazine of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.5, No.1, pp.8-13, 2005.
- [2] 「9.12지진백서」, 국민안전처 재난관리실, pp.31, 2017.
- [3] H. Choi, "Strong Ground motion simulation at seismic stations of metropolises in South Korea by scenario earthquake on the causative fault of the 2016 gyeongju earthquake," *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.24, No.2, pp.59-65, 2020.
- [4] R. M. J. Amey, A. Hooper, and R. J. Walters, "A bayesian method for incorporating self-similarity into earthquake slip inversions," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol.123, No.7, pp.6052-6071, 2018, <https://doi.org/10.1029/2017JB015316>.
- [5] M. A. Denolle and P. M. Shearer, "New perspectives on self-similarity for shallow thrust earthquakes," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol.121, No.9, pp.6533-6565, 2016. doi:10.1002/2016JB013105.
- [6] J.-H. Wang, "A review on scaling of earthquake faults," *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, Vol.29, No.6, pp.589-610, 2018, doi: 10.3319/TAO.2018.08.19.01.
- [7] V. S. Zakharov, "Preliminary analysis of the self-similarity of the aftershocks of the Japanese earthquake on March 11, 2011," *Moscow University Geology Bulletin*, Vol.67, pp.133-137, 2012.
- [8] Z. Zhan, "Mechanisms and implications of deep earthquakes," *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol.48, pp.147-174, 2020.
- [9] "Leaflet for R," RStudio, 2014-2016, accessed September 26, 2022 [Internet], <https://rstudio.github.io/leaflet/>.
- [10] H.-R. Koo, K.-H. Hong, and S.-K. Lim, "Bandwidth allocation for self-similar data traffic characteristics," *Conference on the Korea Contents Association*, Vol.3, No.1, pp.410-415, 2005.
- [11] J. Beran, "Statistics for Long-Memory Processes," Chapman and Hall, New York, 1994.

[12] J. Chen, Z. Yan, L. Xu, Z. Liu, Y. Liu, and J. Tian, "The nonlinear time sequence analysis in the alpine-himalayan earthquake zone," *E3S Web of Conference*, Vol.299, No.02001, 2021.

[13] R. Console, A. M. Lombardi, M. Murru, and D. Rhoades, "Báth's law and the self-similarity of earthquakes," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth. American Geophysical Union (AGU)*, pp.23\_1-9, 2003. <https://doi.org/10.1029/2001jb001651>.

[14] H.-D. Jeong, J.-S. Lee, K. Pawlikowski, and D. McNickle, "Comparison of various estimators in simulated FGN," *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol.15, pp. 1173-1191, 2007.

[15] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, and D. V. Wilson, "On the self-similar nature of ethernet traffic (Extended Version)," *IEEE ACM Transactions on Networking*, Vol.2, No.1, pp.1-15, 1994.

[16] J. Li and Y. Chen, "Rescaled range (R/S) analysis on seismic activity parameters," *Acta Seismologica Sinica*, Vol.14, pp.148-155 (2001). <https://doi.org/10.1007/s11589-001-0145-9>.

[17] "Earthquakes and tsunami occurrence statistics", South Korea Meteorological Administration, 2022, accessed September 19, 2022 [Internet], [https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=141&tblId=TX\\_14101\\_A001&vw\\_cd=MT\\_ZTITLE&list\\_id=C\\_23&scrId=&seqNo=&lang\\_mode=ko&obj\\_var\\_id=&itm\\_id=&conn\\_path=MT\\_ZTITLE&path=%252FstatisticsList%252FstatisticsListIndex.do](https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=141&tblId=TX_14101_A001&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=C_23&scrId=&seqNo=&lang_mode=ko&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITLE&path=%252FstatisticsList%252FstatisticsListIndex.do).

[18] 「Pohang Earthquake Analysis Report」, Bureau of Earthquakes and Volcanoes, South Korea Meteorological Administration, pp.48-49, 2018.

[19] Y.-G. Jeong and J.-Y. Chae, "The largest earthquake ever with a magnitude of 5.2 at Uljin Sea," 2004, accessed September 20, 2022 [Internet], <https://www.donga.com/news/Society/article/all/20040530/8066887/1>.

[20] "Earthquake and volcano (past earthquake) ranking by magnitude," Weather Nuri of the South Korea Meteorological Administration, accessed September 20, 2022 [Internet], <https://www.weather.go.kr/w/eqk-vol/archive/stat/list-by-size.do>.

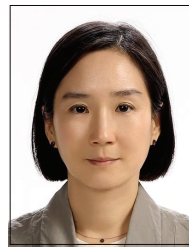
[21] 「History of earthquakes on the Korean Peninsula (2 years~1904)」, National Institute of Meteorological Sciences, 2012.

[22] "Historic earthquakes," Weather Nuri of the South Korea Meteorological Administration, accessed September 26, 2022 [Internet], <https://www.weather.go.kr/w/eqk-vol/archive/historical-eqk.do>.



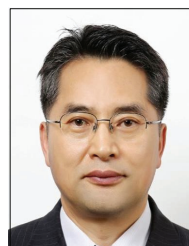
### 황재민

<https://orcid.org/0009-0000-8764-8165>  
 e-mail : codingmins@gmail.com  
 2018년 ~ 2023년 한국성서대학교  
 컴퓨터소프트웨어학과 학부생  
 관심분야 : Machine Learning &  
 Artificial Intelligence



### 임지영

<https://orcid.org/0000-0002-3529-6687>  
 e-mail : jyilm@bible.ac.kr  
 2001년 이화여자대학교 컴퓨터공학과(박사)  
 2003년 ~ 현 재 한국성서대학교  
 컴퓨터소프트웨어학과 교수  
 관심분야 : Network, Network Security,  
 Machine Learning



### 정해덕

<https://orcid.org/0000-0002-8486-074X>  
 e-mail : joshua@bible.ac.kr  
 2003년 Canterbury대학교 Computer  
 Science & Software  
 Engineering 학과(박사)  
 2004년 ~ 현 재 한국성서대학교  
 컴퓨터소프트웨어학과 교수  
 관심분야 : Traffic Modeling & Analysis, Computer  
 Simulation, Machine Learning