

ISSN 0435-4036 (Print) ISSN 2288-7377 (Online)

지질학회지 제 55권 제 1호, p. 105-115, (2019년 2월) J. Geol. Soc. Korea, v. 55, no. 1, p. 105-115, (February 2019) DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2019.55.1.105

ETAS 모델에 의한 한반도의 최근 지진활동 분석

김성균 전남대학교 지구환경과학부

요 약

ETAS (epidemic-type aftershock sequence) 모델을 사용하여 한반도의 최근 지진활동을 분석하였다. ETAS 모델은 한 지역에서 관측된 지진활동률을 개개의 지진이 각각 독립된 배경지진 활동률과 모든 지진에 의해 격 발되는 여진 활동률의 합으로서 표현하는 점과정 모델이다. ETAS 모델의 상수들은 어떤 기간에 관측된 절단규 모 이상의 지진자료를 모델에 맞춰 추정하며, 시간에 따라 관측된 지진수를 모델상수로부터 계산한 지진수와 비교함으로서 지진활동을 분석하게 된다. 절단규모 4.5이상의 지진에 대해 관측된 지진수와 계산된 지진수를 1967년부터 2017년까지 누적한 그림은 서로 개략적으로 일치한다. 그러나 그림으로부터 지진활동이 상대적으로 활동적인 시기와 그렇지 않은 시기를 지적할 수 있다. 지진활동은 관측된 누적지진수가 급격히 증가하는 1960년, 1978년, 1982년 및 2016년부터 2017년까지 활동적인 것으로 나타난다. 또한 지진활동이 저조한 기간 은 1961년부터 1977년까지와 1996년부터 2013년까지인 것으로 식별할 수 있다. KMA (2018)에 의하면 관측 초기에 비하여 1990년 이후 연간 지진관측 횟수는 점진적으로 증가하고 있으며, 특히 최근의 관측횟수는 급증 하고 있다. 이러한 관측횟수의 증가가 지진활동의 증가와 관련된 것인지 또는 관측계기와 부지환경과 같은 지 진관측여건의 향상에 의한 것인지에 대한 논쟁이 있을 수 있다. 이 연구에서의 지진활동 분석결과를 참조한다 면, 1990년 이후의 관측횟수의 증가는 대부분 관측여건의 향상과 관련이 크다고 결론지을 수 있다. 그러나 이 러한 지진관측 여건의 개선 외에도 2016년 경주지진(ML 5.8)을 시작으로 한반도 남동부 지역의 지진활동이 활 발해 진 것을 인정할 수 있다.

주요어: 지진활동, ETAS 모델, 한반도

Sung Kyun Kim, 2019, Analysis of the recent seismicity by the ETAS model in the Korean Peninsula. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 1, p. 105-115

ABSTRACT: The recent seismicity of the Korean Peninsula is analysed by an epidemic-type aftershock sequence (ETAS) model. ETAS model is a point process model that describes the seismicity rate observed in a region as a summation of a background rate of independent events and the aftershocks triggered by each event. The model parameters were estimated by fitting the ETAS model to earthquake data above a given cutoff magnitude observed in a specific period. Then the seismicity is analysed by comparing the observed number of events with the calculated number of events from model parameter versus time. The plots of calculated and observed cumulative number of earthquakes above cutoff magnitude 4.5 versus the period from 1960 and 2017 appeared to be in roughly agreement with each other. However, it is possible to point out some periods to be relatively active and inactive. The seismicity appeared to be active in 1960, 1978, 1982, and 2016 in which the observed cumulative number of events increase abruptly. Also, two inactive periods from 1961 to 1977 and from 1996 to 2013 can be discriminated from the comparison of calculated and observed cumulative number of events. According to KMA (2018), the annual observed number of earthquakes since 1990 has been gradually increasing compared with that of the early observation stages. Especially, recent number of observations are increasing rapidly. There may be arguments as to whether this increase in number of observations is related to the increase in seismicity or due to the improvement in observational conditions such as instruments and site circumstances. Referring to the results of the analysis of seismicity in this study, it can be concluded that the increase in the number of observations since 1990 is largely related to the improvement of seismic observation conditions. However, we can admit that the seismicity in the southeastern region of the Korean Peninsula has been active since the 2016 Gyeongju earthquake (M_L 5.8).

Key words: seismicity, ETAS model, Korean Peninsula

(Sung Kyun Kim, Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-62-575-5424, E-mail: kimsk@jnu.ac.kr

김성균

1. 서 론

현재 및 과거 지진활동에 대한 연구는 미래 지진 활동을 예측하는 데에 큰 도움이 된다는 점에서 대 단히 중요하다. 한반도 지진활동에 관한 연구는 역 사지진 자료의 분석으로부터 시작되었다. 역사지진에 관한 연구는 Wada (1912)이래 여러 연구자들에 의 하여 수행되어 왔다. Wada (1912)는 삼국사기, 고려 사, 조선왕조실록 등의 역사문헌 14종으로부터 지진 에 관한 1700여개의 기사를 발췌하여, 자신의 진도분 류기준(4등급)에 의하여 역사지진을 분류하였다. Kim (1978)은 Wada (1912)의 자료를 재검토하여 Wada 의 진도를 JMA진도로 고쳐 지역별 지진발생 빈도 분포도를 작성하였다. Jeong (1981)은 삼국사기, 고 려사, 조선왕조실록, 일성록 및 동국문헌비고 등의 역사문헌으로부터 총 1766개의 지진을 발췌하여 지 역별, 시대별 발생빈도를 제시하였다.

한편 KIER (1983)는 원자력발전소의 지진에 대한 안전성을 검토할 목적으로 역사지진과 1905년이래 의 계기지진목록을 만들어, 이 목록에 근거하여 한반 도의 지진위험도를 작성하였다. 이 연구에서는 Wada (1912)의 자료에 나타난 지진기사들을 원래의 문헌 으로부터 발췌하여, 역사학자들의 충분한 검토해석 을 거쳐 진앙지와 진도를 평가하였다. 그 후 Lee and Yang (2006)은 문헌상의 역사지진 자료를 면밀히 재 평가하여 2185개의 지진에 대한 발생시기, 진앙지, 진 도 및 규모를 재결정하였으며, 이 목록을 이용하여 얻은 지진의 시공간 분포로부터 한반도의 지진활동 을 분석하였다. 또한 Kyung (2011)은 Lee and Yang (2006)의 목록을 기초로 하여, 감진지역을 상세히 조 사하여 진앙지를 일부 재결정한 목록을 작성하였으 며, KMA (2012)는 Kyung (2011)의 목록을 약간 수 정하여 새로운 목록을 공표하였다. 한편 한국지질자 원연구원은 연구과제 "활성단층 지도 및 지진재해 지도 작성"을 수행하기 위하여 삼국사기, 고려사, 조 선왕조실록과 같은 1차 사료와 고려사절요, 승정원 일기, 증보문헌비고 등의 사료들로부터 지진과 관련 된 기사를 추출하고 이와 관련된 기존의 역사지진 평가자료를 수집, 제시하였다. 이 자료들을 기초로 하고, 과거에 발표된 역사지진 목록들을 재검토하여 GSK (2011)는 새로운 역사지진 목록을 작성하였다. 이상이 역사문헌으로부터 발췌한 지진자료들을 이 용한 목록작성 및 지진활동 분석에 관한 대표적인 연구들이다.

1905년부터 시작된 계기관측에 의한 지진자료는 역사지진 자료에 비하여 기간은 짧지만 자료의 질 (발생시각, 진앙지 및 지진의 크기 등)이 월등하다는 장점이 있다. 역사지진자료에 더하여 계기지진 자료 까지를 포함한 지진활동에 관한 다수의 연구들이 수 행되어 왔다. 예를 들면 지역별 지진활동과 다른 지 구물리학적 자료 및 구조선과의 관련성을 조사, 분 석한 연구로서 Lee et al. (1987, 1988, 1989) 등을 들 수 있으며, 이 연구들은 대부분의 지진활동이 지체 구조선 밀도가 높은 곳에서 발생했다고 보고했다. 한 편 Kyung (1989)은 한반도 지진활동의 시공간 특성, 도상식별을 통한 대지진 발생의 양상, 지진활동과 지형, 중력 등의 관계를 종합적으로 폭 넓게 분석하 였다. Kim (1997)는 역사지진 및 계기지진자료를 분 석하여 과거, 현재, 미래의 지진활동에 대하여 토론 했다. 한반도에서 발생가능한 지진에 대하여 Kim et al. (2001)에서는 규모 7.1을 제시하였고, KHNP (2015) 에서는 Gumbel의 제3점근선 모델을 이용하여 Mw=7.16 을 얻었다. 또한 Hong et al. (2016)에서도 다양한 확 률론적인 방법을 사용하여 한반도에서 발생 가능한 최대지진이 7.0 이상이라는 점을 밝혔다.

KHNP (2015)에 의해 작성된 계기지진목록(1905-2012)에 2012년 이후의 기상청 지진목록을 추가하여 가공한 지진목록으로 그린 계기지진 활동도를 그림 1에 제시한다. 그림에서 지진활동의 공간분포는 대 체로 남동해안과 서해안쪽이 활발하며, 한반도 남동 부에서 서북서 방향으로 활발한 양상을 보여준다. 한 편 그림 2에 나타낸 시간적인 지진발생의 빈도(KMA, 2018)를 조사해 보면, 관측초기에 비하여 최근의 발 생횟수(실제로는 발생횟수가 아니고 관측횟수라고 봄이 타당하며, 이하에서는 발생횟수를 관측횟수로 표현함)가 급증하는 것처럼 보인다. 즉 연간 지진관 측 횟수는 1990년 이후 점진적으로 증가하고 있으 며, 특히 2013년 이후 급격한 증가를 보여 준다. 이러 한 관측횟수의 증가가 지진활동의 증가에 의한 것인 지 또는 관측계기 및 관측환경과 관련된 관측여건의 개선에 의한 것인지 불분명하다. 그림에서 1978년부 터 1998년까지의 연간 평균 지진관측 수는 19.2회이 고 그 이후 67.6회로 급증하고 있으나, 유감지진의 수는 2015년까지는 큰 변화가 없는 것으로 나타난 다. 이와 같은 지진관측 횟수의 증가는 상당부분 지 진관측소 밀도의 증가와 지진계 성능의 향상과 밀접 한 관련이 있는 것으로 볼 수도 있다. 왜냐하면 관측 소가 지리적으로 적절히 분포되어 있고 그 수가 많 고 지진계의 성능이 좋을수록, 지진관측의 기회가 증 가하기 때문이다. 그러나 이러한 점을 감안하더라도 2011년의 동일본 대지진 이후에 한반도의 지진활동 이 과거에 비해 상대적으로 활발해지고 있다는 연구 결과(Hong *et al.*, 2017)도 있다.

이 연구에서는 1905년 계기관측이래 얻어진 지진목 록을 분석하여 한반도에서 지역별, 시기별로 지진활 동의 변화를 고찰해 보고자 한다. 즉 그림 2에서와 같 은 지진활동의 증가가 통계학적으로 의미가 있는가를 분석할 것이다. 이 분석에는 여진발생에 관한 Omori의 법칙을 일반화한 ETAS (epidemic-type aftershock sequence) 모델(Ogata, 1988; Utsu *et al.*, 1995)을 사 용하게 된다. 그 결과 지진활동을 배경지진활동과 나 머지 지진활동으로 분해하게 되며, 나머지 지진활동 을 해석하여 지진활동의 증가 또는 감소여부를 판단 할 수 있게 된다.

2. 지진자료

현재 및 과거의 지진활동을 조사하기 위해서는 가



Fig. 1. Instrumental seismicity from 1906 to 2017 by the earthquake catalog compiled in this study and the index map (upper right) for the seismicity analysis.

급적 긴 기간에 걸친 지진목록이 필요하다. 또한 지 진이 시공간적으로 고르게 관측된 자료로서 진앙을 비롯한 발생시각 및 지진 규모 등의 지진요소들이 어느 정도의 통일성을 가진 자료라야 한다. 한반도 에는 2000여년에 걸친 역사지진목록과 1906년 이래 110여 년간의 계기지진목록이 존재한다. 그러나 역 사지진 목록의 경우 불확실성이 크고, 시대에 따른 균질성이 결여되어 있기 때문에 지진활동 분석에는 계기지진목록만을 사용하였다. KHNP (2015)는 기 존의 계기지진목록과 이용 가능한 자료들을 재검토 하여, 새로운 계기지진목록을 편집하였다. 편집과정 은 기존 자료를 수집 및 재검토하고 자료병합을 통 하여 중복자료의 제거 및 신규자료의 삽입과정 등을 거쳤다. 또한 적절한 전환식을 이용하여 지진규모를 모멘트규모(Mw)로 통일하였다. 이 연구에서는 기 본적으로 KHNP (2015)에 의해 편집된 지진목록을 사용한다. 이 목록은 2012년까지만 작성되었으므로, 그 이후 2017년까지는 기상청의 지진목록을 추가하 여 사용하였다. 기상청의 지진목록에서의 규모는 국 지지진규모 ML로 되어있다. 그러나 Kim and Kim (2008)은 2000년 이후의 기상청 지진목록에서의 규 모 ML은 Mw와 작은 규모 구간내에서 거의 일치한 다고 보고하였다. 이 연구에서는 이 결과를 참조하 여 ML을 Mw로 간주하였으며, 큰 규모 지진에 대해 서는 Kim and Kim (2008)과 Rhee and Sheen (2016) 에서 구해진 Mw를 참조하여 수정하였다.

일반적으로 어떤 지역에서 관측할 수 있는 지진 의 수는 관측소의 분포와 관측계기의 영향을 크게 받게 된다. 즉 관측망이 조밀하고 계기의 성능이 높 을수록 작은 규모의 지진까지도 관측이 가능하고 진 앙지 및 규모의 정밀도를 높일 수 있게 된다. 약 110 여년에 걸친 한반도의 계기지진 관측역사(Ryoo, 2006) 는 관측소의 분포나 관측계기에 있어서 단순하지 않 으며, 그 결과 자료는 시공간적으로 균질하게 획득되 었다고 할 수 없다. 즉 시공간적으로 완전성이 보장 되는 최소규모 즉 완전성 규모(completeness magnitude: M_c) 또는 절단규모(cutoff magnitude)는 다 르다고 할 수 있다. 따라서 시간에 따른 지진활동 분 석을 위해서는 절단규모보다 큰 규모 지진들의 발생 률을 비교할 필요가 있다. KHNP (2015)는 4각형 범 위의 지역(경도 124°-130°, 위도 34°-42°)에 대한 계 기지진목록을 Stepp (1972)의 방법으로 분석하여 M. 를 시기별로 추정하였다(그림 3). Stepp (1972)의 방 법은 지진발생이 시간에 따라 일정하다는 가정에 따 라, 양대수축에서 관측기간에 대한 특정 규모의 지 진발생률의 표준편차가 직선으로 나타나는 기간을 찾아 Me를 시기별로 추정하는 하나의 방법이다. 이 에 대한 상세한 내용은 KHNP (2015)에서 찾아 볼 수 있다. 그림에서 1906년부터 1955년까지의 M.는 Mw≥5.0, 1956년부터 1967년까지는 Mw≥4.5, 1968



Fig. 2. Observed No. of earthquakes from 1978 to 2017 (modified from KMA, 2018).

년부터 1975년까지는 Mw≥4.0, 1976년부터 1999년 까지는 Mw≥3.5, 2000년부터는 Mw≥2.5로 나타난 다. 이 연구에서는 기본적으로 이 값을 사용하여 지 진활동을 분석한다.

3. ETAS 모델

여진활동의 시간에 따른 감소를 나타내는 법칙은 Utsu (1961)에 의해 제안되었으며, 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$n(t) = K \frac{1}{(c+t)^p} \tag{1}$$

여기서 n(t)는 본진발생 후 시간 t에서 절단규모 이상의 단위시간당 여진 발생률을 나타내며, K, c, p는 각각 상수이다. 1894년 Omori는 식 (1)에서 p=1인 경우의 단순한 식을 발표하였으며, Utsu (1961)에 의해 식 (1)과 같이 개량되었다. 따라서 식 (1)을 수정 Omori 식(Modified Omori's Formula)이라 부른다.

식 (1)에서 K는 절단규모와 자료 수에 관련된 상 수이며, c는 특성시간을 나타내는 상수이다. 상수 c 는 본진발생 직후 여진목록의 완전성에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 값을 구하기는 쉽지 않 다. 보통 c 값은 0.01에서 1일 사이의 값을 가지며, 그 평균은 0.3일 정도이다(Utsu et al., 1995). Enescue et al. (2009)은 여진기록에 고주파 통과필터를 통과 시켜, 본진 직후 작은 여진까지도 검출하여 작성한



Fig. 3. Variation of the completeness magnitude estimated using the method of Stepp (1972) redrawn from KHNP (2015).

목록으로 c 값을 계산한 결과, 0에 가까운 지극히 작 은 c 값을 얻었다.

지수 p는 p값이라 불리며, 일반적으로 절단규모 와 관련없이 0.6에서 1.8사이의 값을 가진다(Wiemer and Katsumata, 1999). 그러나 Utsu et al. (1995)에 서는 절단규모에 따라 p 값이 달라짐을 보여준다. 수 정된 Omori 식에서 p값은 지각의 불균질, 응력 및 온도와 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Kisslinger and Jones, 1991; Utsu et al., 1995). Dieterich (1994) 는 본진후 단층면에 작용하는 응력이 감소함에 따라 p값이 1.0보다 커진다는 것을 모델시험으로 입증하 였다. Enescu and Ito (2002)는 본진시에 큰 변위 가 있었던 곳에서 큰 p값이 나타난다고 보고하였다. Kisslinger (1993)는 일본 주변의 여진활동을 분석하 여, 섭입대와 같은 낮은 온도 지역에서는 p값이 작 고, 화산대와 같은 높은 온도 지역에서는 큰 p값이 나타난다고 주장하였다. 특히 p 값과 열류량 사이의 상관관계는 여러 연구(Kisslinger and Jones, 1991; Rabinowitz and Steinberg, 1998)에서 거론되었으 며, 일반적으로 열류량이 높은 지역에서 p값이 크다 고 알려져 있다. 현재로서는 p 값이 어떤 요인과 가장 관련이 큰가는 아직 명확하지 않다(Utsu, 1995; Enescu and Ito, 2002).

여진에 관한 수정 Omori 식을 확장한 ETAS 모델 에서는 하나하나의 모든 지진이 여진활동을 유발한 다고 가정한다. 따라서 ETAS 모델은 한 지역에서 관측된 지진활동률을 개개의 지진이 여진과 무관하 며 각각 독립된 배경지진 활동률과 모든 지진에 의 해 격발되는 여진 활동률의 합으로서 표현하는 하나 의 점과정(point process) 모델이라 할 수 있다(Ogata, 1988). 절단규모가 M_c 인 지진목록에서 i 번째 지진의 발생시각을 t_i , 그 규모를 M_i 라 할 때, 시간 t 에서의 지진발생률 $\lambda(t)$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다 (Utsu *et al.*, 1995).

$$\begin{split} \lambda(t) &= \mu + \sum_{t_i < t} g(t - t_i) \\ g(t - t_i) &= K \mathrm{exp}[\alpha(M_i - M_c)] / (t - t_i + c)^p \quad \mbox{(2)} \end{split}$$

여기서 μ 는 배경지진 활동률을 나타내며, $g(t-t_i)$ 는 여진 활동률을 나타낸다. 또한 α 는 여진을 얼마

Zone	Period	M_c (Mw)	No. of Event	μ	K	с	α	p
0	1960-2017	4.5	35	5.254e-5	2.322e-2	1.534e-2	2.951e-1	0.7533
1	1968-2017	4.0	30	8.248e-5	4.985e-3	2.360e-1	1.892e0	0.6472
2	1976-2017	3.5	39	3.894e-5	4.435e-3	1.713e-3	1.105e0	0.5936
3	1976-2015	3.5	57	4.323e-5	1.231e-2	9.139e-5	1.258e0	0.7079
4	2001-2015	2.5	53	2.942e-5	1.963e-2	1.054e-3	6.504e-1	0.6480

 Table 1. The maximum likelihood estimates of the ETAS model fitted to the instrumental catalog of the Korean Peninsula.

만큼 효율적으로 만들어 내는가를 나타내는 상수이 며, 상수 K, c, p는 식 (1)에서 설명한 여진활동에 관한 상수들이다. 식 (2)에 포함된 상수들은 어떤 지 역의 지진활동 특성을 나타내는 상수라 할 수 있으 며, 다음과 같은 최대우도함수 L을 최대화함으로서 구할 수 있다(Llenos and Michael, 2013).

$$\ln L(\mu, K, c, \alpha, p) = \sum_{t_i < T_E} \ln \lambda(t_i) - \int_{T_S}^{T_E} \lambda(t) dt \qquad (3)$$

여기서 T_s 와 T_E 는 각각 지진목록에서 의미가 있 는 시간범위내의 시작시간과 끝시간을 나타낸다. 또 한 시간 T_s 에서부터 t까지 발생된 누적지진의 수는 다음 식으로 주어진다(Utsu *et al.*, 1995).

$$\Lambda(t) = \int_{T_S}^t \lambda(s) \, ds$$

= $\mu(t - T_S) + K \sum_{t_i < t} \exp[\alpha (M_i - M_c)]$
 $[c^{1-p} - (t - t_i + c)^{1-p}]/(p-1)$ (4)

어떤 지역에서 시간에 따라 관측된 누적지진 수(관 측치)를 위 식에 의해 구한 누적지진 수(이론치)와 비교함으로서 지진활동을 평가할 수 있다. 즉 관측 치가 이론치보다 클 때는 지진활동이 활발하다고 할 수 있으며, 반대인 경우는 지진활동이 정상보다 저 조하다고 할 수 있다(Utsu *et al.*, 1995; Ogata, 2005; Llenos and Michael, 2013).

4. 지진활동 분석

한반도에서의 지진활동 분석을 위하여 한반도 및

인접해역을 그림 1(오른쪽 위의 작은 지도)과 같이 4 각형으로 이루어진 몇 개의 지역으로 나누었다. 즉 전체지역은 경도 124°-130°, 위도 34°-40° 범위의 지 역이며 위도 40°이상의 북쪽 지역은 지진발생빈도가 낮아 제외하였다, 지역 1(중북부 지역)은 경도 124°-130°, 위도 37°-40°, 지역 2(남서부 지역)는 경도 124°-127°, 위도 34°-37°, 지역 3(남동부 지역)은 경도 127°-130°, 위도 34°-37°, 지역 4(2016년 ML 5.8 경주지진과 2017 년 ML 5.4 포항지진 발생지역)는 경도 128.5°-130°, 위도 35°-36.5°로 되어 있다. 지역 4를 제외한 지역의 분할에 특별한 의미는 없으며, 더 상세한 지역구분은 자료수가 적어져 분석의 신뢰도를 떨어뜨린다. 결국 각 지역별로 일정규모 이상의 지진활동을 ETAS 모 델에 맞도록 지진활동 상수들을 추정하였다. 실제로 는 식 (3)의 최대우도함수의 해를 구하는 것과 같은 것이며, 그 결과를 표 1에 제시하였다. 표에서 zone 0는 전체지역(경도 124°-130°, 위도 34°-40° 범위의 4각형 지역)을 나타내며, 한반도 전체의 개략적인 지 진활동을 분석하기 위하여 설정되었다. 또한 zone 4 는 2016년 경주지진과 2017년 포항지진이 발생한 지 역의 지진활동을 좀 더 상세히 살펴보기 위하여 설 정되었다. 앞에서도 서술한 바와 같이, 어떤 기간 내 의 지진활동을 분석하기 위해서는 그 기간 동안에 관측된 절단규모 이상 지진의 발생률을 비교할 필요 가 있다. 지진활동 분석은 가급적 긴 기간에 대하여 수행되어야 하나 기간을 길게 선택하면, 절단규모가 커져 자료수가 적어 분석의 신뢰도가 낮아진다. 이 러한 점을 고려하여 각각의 지역에서의 분석기간은 Stepp (1972)의 방법에 의해 결정된 절단규모(그림 3)와 자료 수를 고려하여 적절히 결정되었다. 따라 서 지역마다 분석대상 기간이 달라진다. 지역 1과 2 에서는 2017년까지의 자료를 대상으로 하였으나, 경

주지진과 포항지진의 진앙이 포함된 지역 3과 4에서 는 2015년까지의 자료를 대상으로 하였다. 그 이유 는 경주지진 이후 여진활동에 의한 지진 수의 급증 으로 지진활동을 무리하게 식 (3)에 맞추는 것이 불 합리하기 때문이다. 따라서 이 지역에서는 2015년까 지의 자료로부터 구한 상수들을 이용하여 그 이후를 예측하게 된다.

표 1에서 지역과 기간 및 절단규모에 따른 자료 수는 각각 다르며, 이에 따라 얻어진 상수들의 값도 다양하게 나타난다. 앞에서 언급한 바와 같이, 일반 적으로 p 값은 지역의 특성과 관련을 갖는 것으로 알 려져 있다. 2016년에 발생한 경주지진(ML 5.8)의 여 진활동을 분석한 Lee et al. (2017)은 절단규모 1.6에 서 2.4까지에 대한 p값의 평균치로서 0.943이라는 값을 얻었다. 표 1에서 p 값은 대략 0.65에서 0.75까 지 변화하며, 이 값은 경주지진의 여진활동으로 얻 어진 값과 비교하여 상대적으로 작다. 경주지진의 진 앙이 포함된 지역 4에 대한 p 값은 0.648로서 다른 지 역의 값과 유사하나, 경주지진의 여진활동으로 구한 0.943에 비하여 지나치게 작다. 그러나 지역 4에서 얻어진 p값 0.648은 절단규모 2.5 이상의 모든 지진 을 본진으로 하는 모든 여진활동에 의한 값이므로 규모 5.8인 경주지진만의 여진활동으로 얻어진 p값 과 직접적인 비교는 의미가 없다.

한편 표 1과 같이 추정된 상수들을 식 (4)에 대입 하여 시간에 따른 누적 지진수를 계산할 수 있다. 이 와 같이 계산된 누적 지진수(ETAS 모델에 맞춰 계 산된 값)를 관측된 누적 지진수와 비교하여 시간에 따른 지진활동을 평가할 수 있다. 이 연구에서는 식 (3)의 최대우도함수와 식 (4)의 적분함수 계산에 Ogata



Fig. 4. Cumulative number of events ($Mw \ge 4.5$) versus time observed (solid line) and fitted by the ETAS model (dashed line) from 1960 to 2017 for the zone 0 (longitude: $124^{\circ}-130^{\circ}$, latitude: $34^{\circ}-40^{\circ}$).

(2006)의 컴퓨터 프로그램 SASEIS2006을 사용하였다. 그림 4는 전체지역(zone 0)에서 1960년부터 2017

년까지 절단규모 4.5 이상의 지진에 대하여 관측된 누적지진수와 ETAS 모델에 맞춰 계산된 누적지진 수와 비교한 것이다. 그림에서 관측치와 계산치는 서로 개략적으로 일치한다. 그러나 뚜렷하지는 않지 만, 그림으로부터 지진활동이 상대적으로 활동적인 시기와 그렇지 않은 시기를 지적할 수 있다. 지진활 동은 관측된 누적지진수가 급격히 증가하는 1960년, 1978년, 1982년 및 2016년부터 2017년까지 활동적 인 것으로 나타난다. 또한 지진활동이 저조한 기간 은 1961년부터 1977년까지와 1996년부터 2013년까 지인 것으로 식별할 수 있다. 1960년의 활발한 지진 활동은 황해도 옹진반도 재령일대에서 발생한 일련 의 지진과 관련이 있으며, 1978년에는 속리산지진(ML 5.2) 및 홍성지진(ML 5.0)으로 지진활동이 증가하게 되었다. 그 이후 1982년의 재령일대 지진에 의해 활 발한 지진활동이 지속되었다고 할 수 있다. 또한 2016 년부터 2017년까지의 활발한 지진활동은 2016년의 경주지진과 2017년의 포항지진과 관련이 있다. 이상 에서 알 수 있는 바와 같이 활발한 지진활동은 대부 분 큰 지진과 관련이 있다.

그림 5는 지역 1에서 1968년부터 2017년까지 절 단규모 4.0 이상의 지진에 대하여 관측된 누적지진 수와 ETAS 모델에 맞춰 계산된 누적지진 수와 비교 한 것이다. 관측치와 계산치를 비교해 보면 1968년 부터 1975년까지는 지진활동이 약간 저조한 활동을 보이고 있다. 또한 옹진반도 재령일대에서 발생한 지 진들의 영향으로 1982년부터 1989년까지, 1996년부 터 1999년까지는 활발한 지진활동을 보인다. 그림 6



Fig. 5. Cumulative number of events ($Mw \ge 4.0$) versus time observed (solid line) and fitted by the ETAS model (dashed line) from 1968 to 2017 for zone 1.

은 지역 2에서 1976년부터 2017년까지 절단규모 3.5 이상의 지진에 대하여 관측된 누적지진수와 ETAS 모 델에 맞춰 계산된 누적지진수를 비교한 것이다. 관 측치와 계산치를 비교해 보면, 이 지역은 1976년부 터 2017년 사이에 관측치와 계산치가 거의 일치하 며, 이것은 이 지역내에서 이 기간 동안에 거의 정상 적인 지진활동이 이루어지고 있음을 의미한다.

그림 7은 지역 3에서 1976년부터 2015년까지 절 단규모 3.5 이상의 지진에 대하여 관측된 누적지진 수와 ETAS 모델에 맞춰 계산된 누적지진 수와 비교 한 것이다. 2016년에 발생한 경주지진과 2017년에 발생한 포항지진으로 관측된 지진수가 2016년 이후 급격히 증가한 까닭으로, 2015년까지의 자료만을 사 용하여 ETAS 모델에 맞는 상수들을 구했다. 이 상 수들을 입력하여 누적지진수에 대한 계산치는 2018 년까지 구했다. 그림에서 관측치와 계산치는 1976년 부터 2015년까지 거의 일치하며, 이것은 이 기간 동 안에 이 지역의 지진활동이 지극히 정상적이었음을 나타낸다. 그러나 2016년 이후 지진활동이 급격히 증가함을 보여 주고 있다.



Fig. 6. Cumulative number of events ($Mw \ge 3.5$) versus time observed (solid line) and fitted by the ETAS model (dashed line) from 1976 to 2017 for zone 2.



Fig. 7. Cumulative number of events ($Mw \ge 3.5$) versus time observed (solid line) and fitted by the ETAS model (dashed line) from 1976 to 2015 for zone 3.

그림 8은 경주지진과 포항지진이 발생한 비교적 좁은 지역(지역 4)을 대상으로 2001년부터 2015년까 지 관측된 절단규모 2,5이상의 지진을 자료로 하여 관측치와 ETAS모델에 맞는 계산치를 도시하였으 며, 2015년 이후 2018년까지는 계산된 예측치를 도 시하였다. 그림에서 관측치와 계산치는 2001년부터 2015년까지 거의 완벽히 일치하며, 이것은 이 기간 동안에 이 지역의 지진활동이 지극히 정상적이었음 을 나타낸다. 그러나 2016년 경주지진 발생이후부터 지진활동이 급격히 증가함을 보여 주고 있다.

5. 토론 및 결론

전 절에서는 한반도와 인접해역(경도 124°-130°와 위도 34°-40°로 둘러싼 4각형 지역)의 계기지진활동 을 ETAS 모델에 적용하여 분석하였다. 이를 위하여 전체지역과 4개로 나누어진 각각의 지역 내에서 특 정의 기간에 관측된 일정규모 이상의 지진활동을 ETAS 모델에 맞춰 지진활동 상수들을 추정하였다. 또한 추 정된 상수들을 입력하여 계산된 누적지진수(계산치) 와 관측된 누적지진수(관측치)를 비교하여 지역별 지 진활동을 분석하였다. 분석에 사용한 자료는 KHNP (2015)에 의해 편집된 지진목록이며, 이 목록은 2012 년까지만 작성되었으므로 그 이후 2017년까지는 기 상청의 지진목록을 추가하여 사용하였다. KHNP (2015) 는 적절한 전환식을 이용하여 지진규모를 모멘트규 모(Mw)로 통일하였다. 그러나 지진관측 시기와 관 측계기에 따라 다양한 규모가 사용되어 이들 규모를 Mw로 전환하는 과정에 여러 문제점이 있었다고 할 수 있다. 한편 현재 기상청의 지진목록에서의 규모 는 ML로 되어있다. 이 규모를 Kim and Kim (2008)



Fig. 8. Cumulative number of events ($Mw \ge 3.5$) versus time observed (solid line) and fitted by the ETAS model (dashed line) from 2001 to 2015 for zone 4.

과 Rhee and Sheen (2016)의 결과를 참조하여 2012 년 이후의 규모를 Mw로 수정하였다. 이와 같은 과 정을 거쳐 사용한 모든 기간의 규모가 Mw로 통일 되었으나, 여기에는 상당한 오차가 개입되어 있을 것 으로 추정된다. 그럼에도 불구하고 이 연구에서 얻 어진 주요한 결론은 크게 달라지지 않을 것으로 생 각된다. 왜냐하면, 전지역과 지역 1, 2, 3, 4에 대하여 각각 절단규모 4.5, 4.0, 3.5, 3.5, 2.5이상의 지진을 대 상으로 하였기 때문에 절단규모 부근의 지진의 개수 만이 결과에 영향을 주기 때문이다.

지역 1에서 1968년부터 2017년까지의 관측치와 계 산치를 비교해 보면 1968년부터 1975년까지는 지진 활동이 약간 저조한 활동을 보이고 있다. 또한 옹진 반도 재령일대에서 발생한 지진들의 영향으로 1982 년부터 1989년까지, 1996년부터 1999년까지는 활발 한 지진활동을 보인다. 지역 2에서는 1976년부터 2017 년까지 관측치와 계산치가 거의 일치하며, 이것은 이 지역내에서 이 기간 동안에 거의 정상적인 지진활동 이 이루어지고 있음을 의미한다.

지역 3에서는 1976년부터 2015년까지는 관측치 와 계산치가 거의 일치하며, 이것은 이 기간 동안에 이 지역의 지진활동이 지극히 정상적이었음을 나타 낸다. 그러나 2016년 이후 지진활동이 급격히 증가 함을 보여 주고 있다. 2016년의 경주지진과 2017년 의 포항지진이 발생한 비교적 좁은 지역을 대상으로 하는 지역 4에서는 경주지진 발생 이후부터 지진활



Fig. 9. Cumulative number of event of which magnitude is greater than or equal to 5.0 from 1905 to 2017. The solid and dashed lines represent observed and mean occurrences, respectively. Symbols of a, b, c, and d denote the occurrence time of Jirisan(M_L 5.0), Jaeryeoung(M_L 5.1), Sokrisan (M_L 5.2) and Hongseong (M_L 5.0), and Gyeongju(M_L 5.8) and Pohang(M_L 5.4) earthquakes, respectively.

동이 급격히 활발해진 것을 보여 준다.

전체지역에 대하여 1960년부터 2017년까지 관측 된 절단규모 4.5이상의 누적지진수에 대한 관측치와 계산치가 개략적으로 일치한다고 볼 수 있다. 그러나 아주 뚜렷하지는 않지만, 활동적인 시기와 저조한 몇 몇의 시기를 지적할 수도 있다. 계기지진 목록은 1905 년부터 주어져 있는데도 불구하고 1960년부터의 지 진활동을 취급한 이유는 자료 수와 관련이 있다. 지진 활동에 ETAS 모델을 적용하기 위해서는 어떤 지역 내에서 주어진 기간 동안에 관측에 있어서 완전성이 보장되는 최소규모 즉 완전성 규모 또는 절단규모 이상의 지진만을 대상으로 해야 한다. 따라서 긴 기 간을 선택하면 자료 수가 적어 ETAS 모델의 적용이 어려운 문제점이 있다. 여기서는 좀 더 긴 기간에 대 한 지진활동을 분석하기 위하여 별개의 방법을 사용하 기로 한다. 지진활동이 시간적으로 균일하다는 Poisson 분포로서의 가정을 하면, 일정규모 이상 지진의 연간 평균발생률(annual rate of mean occurrence) λ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\lambda = N/T \tag{5}$$

여기서 N은 기간 T 동안에 발생한 일정규모 이 상 지진의 총 수이다. 또한 연간 평균발생률에 경과 시간을 곱함으로서 예측된 누적지진수를 얻을 수 있 다. Gutenberg-Richter의 지진규모와 규모별 누적 빈도의 통계적 관계에 의하면 작은 지진일수록 그 발생빈도가 지수 함수적으로 증가한다. 따라서 큰 지진이 발생한 시기에는 작은 지진이 다수 동반되어 지진활동이 활발해진다고 볼 수 있다. 그러한 관점 에서 자료수는 적지만 규모 5.0이상 지진의 발생률 에 관한 예측치(계산치)를 관측치와 비교하는 것도 의미가 있을 것으로 생각된다. 그림 3에서 가장 긴 기간인 1905년부터의 절단규모는 5.0이므로, 절단규 모 5.0이상의 지진에 대하여 관측된 누적지진수와 식 (5)에 의해 예측되는 지진수를 비교해 보기로 한다. 그림 9에 1905년부터 2017년까지 규모 5.0이상 지진 의 관측된 누적지진수(실선)와 예측되는 누적지진 수(점선)를 비교하였다. 그 결과 지진활동이 활발한, 즉 누적지진수가 급증하는 시기는 그림에서 a, b, c, d로 표시되어 있으며, 이는 1936년, 1960년, 1978년

그리고 2014년부터 최근까지에 해당한다. 1936년의 지진은 지리산지진(M_L 5.0), 1960년 지진은 황해도 재령지진(M_L 5.1), 1978년 지진은 속리산지진(M_L 5.2) 과 홍성지진(M_L 5.0), 2014년 지진은 서격렬비열도 지진(M_L 5.1) 그리고 2016년의 경주지진(M_L 5.8) 과 2017년의 포항지진(M_L 5.4)이다. 또한 지진활동 이 정상적인 기간은 누적된 예측지진수와 관측지진 수의 경향이 대체로 비슷한 1905년부터 1935년까지 이며, 지진활동이 저조한 기간은 1937년부터 1959년 까지, 1961년부터 1977년까지와 1995년부터 2013년 까지를 들 수 있다. 이상과 같은 분석은 규모 5.0 이 상의 지진활동만을 대상으로 한 해석이지만, 대체적 인 경향은 ETAS 모델에 의한 결과와 유사하다고 할 수 있다.

서론에서 지적한 바와 같이, KMA (2018)의 국내 지진 발생추이에 의하면 관측초기에 비하여 최근의 관측 횟수가 급증하고 있다. 1990년 이후 연간 지진 관측 횟수는 점진적으로 증가하고 있으며, 특히 2013 년 이후 더욱 급격한 증가를 보여 준다. 이러한 관측 횟수의 증가가 지진활동의 증가와 관련된 것인지 또 는 관측계기와 부지환경과 같은 관측여건의 향상에 의한 것인지에 대한 논쟁이 있을 수 있다. 이 연구에 서의 지진활동 분석결과를 참조한다면, 1990년 이후 의 관측횟수의 증가는 대부분 지진관측 여건의 향상 과 관련이 크다고 볼 수 있다. 그러나 이러한 지진관 측 여건의 개선 외에도 2016년 경주지진을 시작으로 한반도 남동부 지역의 지진활동이 활발해 진 것을 인 정할 수 있다.

감사의 글

이 논문의 심사과정 중에 건설적인 비평과 유익 한 조언을 주신 부경대학교 강태섭 교수, 익명의 심 사자와 편집위원께 감사드린다.

REFERENCES

- Dieterich, J.H., 1994, A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. Journal of Geophysical Research, 99, 2601-2618.
- Enescu, B. and Ito, K., 2002, Spatial analysis of the frequency-magnitude distribution and decay rate of aftershock activity of the 2000 Western Tottori earthquake.

Earth, Planets and Space, 54, 847-859.

- Enescu, B., Mori, J.M., Miyazawa, M. and Kano, Y., 2009, Omori-Utsu law c-values assicated with recent moderate earthquakes in Japan. Bulletin of the Seismological Society of America, 99, 884-891.
- GSK, 2011, Compilation of Historical Earthquake Catalogue. Geological Society of Korea, Seoul, 145p (in Korean).
- Hong, T.-K., Lee, J., Kim, W., Hahm, I.-K., Woo, N.C. and Park, S., 2017, The 12 September 2016 MI 5.8 midcrustal earthquake in the Korean Peninsula and its seismic implications. Geophysical Research Letters, 44, 3131-3138.
- Hong, T.-K., Park, S. and Houng, S.E., 2016, Seismotectonic properties and zonation of the far-eastern Eurasian plate around the Korean Peninsula. Pure and Applied Geophysics, 173, 1175-1195.
- Jeong, B.I., 1981, A study on historical earthquakes in Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 17, 257-268 (in Korean with English abstract).
- KHNP, 2015, Investigation and Research of the Maximum Earthquake for Nuclear Power Plant sites (I). Korea Hydro & Nuclear Power Co., LTD, 402 p (in Korean).
- KIER, 1983, Seismic Risk Map of Korea. Korea Institute of Energy and Resource, 295 p (in Korean).
- Kim, S.G., 1978, The Seismicity of the Korean Peninsula. Korea Institute of Resources Development, Seoul, 200 p (in Korean).
- Kim, S.K., 1997, Seismicity of the Korean Peninsula: The past, present and future. Magazine of the Korea Concrete Institute, 9, 4-12 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.K. and Kim, B.C., 2008, The seismic source parameters for earthquakes occurring in the Korean Peninsula. Korean Earth Science Society, 29, 117-127 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.K., Lee, J.M. and Kim, J.K., 2001, Maximum probable earthquakes in the Korean Peninsula. Journal of the Geological Society of Korea, 37, 107-114 (in Korean with English abstract).
- Kisslinger, C., 1993, The stretched exponential function as an alternative model for aftershock decay rate. Journal of Geophysical Research, 98, 1913-1921.
- Kisslinger, C. and Jones, L.M., 1991, Properties of aftershock sequences in southern California. Journal of Geophysical Research, 96, 11947-11958.
- KMA, 2012, Historical earthquakes records in Korea (2-1904). Korea Meteorological Administration, Seoul, 276 p (in Korean).
- KMA, 2018, http://www.weather.go.kr/weather/earthquake_ volcano/domestic- trend. jsp (December 10, 2018).
- Kyung, J.B., 1989, The Characteristics of the Seismicity of the Korean Peninsula. Ph.D. Thesis, Seoul National

University, 327 p.

- Kyung, J.B., 2011, Compilation and DB establishment of Korean Historical Earthquake Catalogue (III). Korea Meteorological Administration, Seoul, 645 p (in Korean).
- Lee, J.M., Kim, S.K. and Ryoo, Y.-G., 2017, Spatiotemporal distribution of the 12 September 2016 Gyeongju earthquake aftershocks, Korea. International Symposium Commemorating the 70th Anniversary of the Geological Society of Korea and 2017 Annual Fall Joint Geology Meeting, Jeju, October 25-28, 139 p.
- Lee, K., Kwon, B.D., Baag, C.E. and Chang, T.W., 1988, Seismicity of the Korean Peninsula: 4. Seismicity of the Okcheon Zone. Journal of the Geological Society of Korea, 24, 464-488.
- Lee, K., Kwon, B.D. and Chang, T.W., 1987, Seismicity of the Korean Peninsula: 5. Seismicity of the Kyeonggi Massif. Journal of the Geological Society of Korea, 23, 257-276.
- Lee, K., Kwon, B.D. and Chang, T.W., 1989, Seismicity of the Korean Peninsula: 3. Seismicity of the Ryeongnam Massif. Journal of the Geological Society of Korea, 25, 474-494.
- Lee, K. and Yang, W.S., 2006, Historical seismicity of Korea. Bulletin of the Seismological Society of America, 96, 846-855.
- Llenos, A.L. and Michael, A.J., 2013, Modeling earthquake rate changes in Oklahoma and Arkansas: Possible signatures of induced seismicity. Bulletin of the Seismological Society of America, 103, 2850-2861.
- Ogata, Y., 1988, Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes. Journal of American Statistical Association, 83, 9-27.
- Ogata, Y., 2005, Detection of anomalous seismicity as a stress change sensor. Journal of Geophysical Research, 110, B05S06, doi:10.1029/2004JB003245.
- Ogata, Y., 2006, Statistical analysis of seismicity updated version (SASEIS2006). In Nanako, J., Ito, S., Kashiwagi,

N. and Takizawa, Y. (eds), Computer Science Monographs. The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo, 2-28.

- Rabinowitz, N. and Steinberg, D.M., 1998, Aftershock decay of three recent strong earthquakes in the Levant. Bulletin of the Seismological Society of America, 88, 1580-1587.
- Rhee, H.M. and Sheen, D.H., 2016, Lateral variation in the source parameters of earthquakes in the Korean Peninsula. Bulletin of the Seismological Society of America, 106, 2266-2274.
- Ryoo, Y.G., 2006, A Study for the Efficient management Scheme of Seismic Network of Korea and Real Time Analysis of Earthquake Data. Ph.D. Thesis, Chonnam National University, Gwangju, 166 p (in Korean with English abstract).
- Stepp, J.C., 1972, Analysis of Completeness of the Earthquake Sample in the Puget Sound Area and its effects on Statistical Estimates of Earthquake Hazard. Proceedings of the International Conference on Micro-zonation for Safer Construction, Research and Application 2, Seattle, WA, 897-909.
- Utsu, T., 1961, A statistical study on the occurrence of their aftershocks. Geophysical Magazine, 30, 521-605.
- Utsu, T., Ogata, Y. and Matsu'ura, R.S., 1995, The cetenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity. Journal of Physics of the Earth, 43, 1-33.
- Wada, Y., 1912, A survey of Korean ancient and recent earthquakes. Report of the study of Korean ancient observations. Meteorological Observatory of the Government General of Korea, 79-105 (in Japanese).
- Wiemer, S. and Katsumata, K., 1999, Spatial variability of seismicity parameters in aftershock zones. Journal of Geophysical Research, 104(B6), 13135-13151.

Received	:	December	14,	2018
Revised	:	January	22,	2019
Accepted	:	January	23,	2019