

# 베이지안 기법을 이용한 국내 지진 사고 예측

양 희 중\*

\*청주대학교 산업정보시스템공학과

## Domestic earthquake prediction using bayesian approach

Hee joong Yang\*

\*Department of Industrial Engineering, Cheong Ju University

### abstract

We predict the earthquake rate in Korea following Bayesian approach. We make a model that can utilize the data to predict other levels of earthquake. An event tree model which is a frequently used graphical tool in describing accident initiation and escalation to more severe accident is transformed into an influence diagram model. Prior distributions for earthquake occurrence rate and probabilities to escalating to more severe earthquakes are assumed and likelihood of number of earthquake in a given period of time is assessed. And then posterior distributions are obtained based on observed data. We find that the minor level of earthquake is increasing while major level of earthquake is less likely.

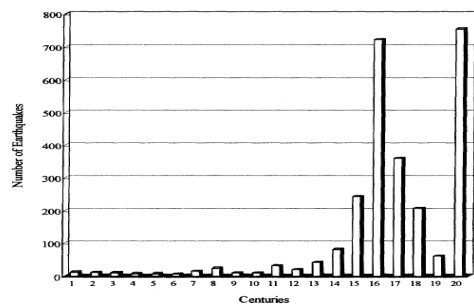
**Keywords :** 지진, 베이지안 예측, 상호연관도

### 1. 서 론

국내에서 지진에 대한 관심이나 우려는 적은 편이었다. 기상청 발표에 따른 해외 인명 피해 사례를 보면 2004년 인도네시아에서 283,000명, 2005년 파키스탄에서 86,000명, 2008년 중국에서 87,600명의 사망자를 비롯하여 많은 인명피해가 세계 각지에서 발생하고 있다 [31]. 우리나라에는 1978년부터 진도 4.0 이상의 지진이 26건 발생했으나 이에 따른 인명 피해는 다행히 발생되지 않았었다[30]. 그러나 1978년 10월 충남 홍성에서 발생한 지진으로 인해 가시적인 피해를 입고 최근에는 위에 언급된 세계 각국의 엄청난 지진피해 상황을 목격하고 우리도 지진에 대한 경각심이 높아지기 시작했다. 흥미로운 것은 과거 우리의 역사 속에 내려오는 자료 중에는 과거(1세기경)부터 지진발생에 대한 기록이 있다는 것이다. 다른 과학적 자료의 상대적 부재에 비해 지진 자료는 상당히 오랜 기간 수집되어 오던 것을 보면 우리 선조들은 지진에 많은 관심을 갖고 있었다는 것으로 유추할 수도 있을 것 같다[4] [6] [9].

국내 지진 활동은 그림 1에서 보는 바와 같이 자료가 존재하는 1세기부터 14세기까지는 미약한 편이었으나 15세기부터 18세기까지는 상당히 활발했고 그 후 다시 미약해지다가 최근 20세기 들어서는 다시 활발해지려는 조짐이 보이고 있다[4].

우리나라는 방진 설계된 건축물 및 토목 구조물의 비율이 아주 적고 특히 도심의 경우 건물 및 구조물들이 밀집되어 있어 일단 대형 지진이 발생하면 그 피해는 상당히 커질 수밖에 없는 실정이다.



<그림 1> 세기별 국내 지진 발생 횟수

† 이 논문은 2008학년도 청주대학교가 지원하는 해외파견으로 연구되었음.

† 교신저자: 양희중, 충북 청주시 상당구 내덕동 36 청주대학교 산업정보시스템공학과

M·P : 019-456-8188, E-mail : hjyang@cju.ac.kr

2009년 8월 6일 접수; 2009년 12월 9일 수정본 접수; 2009년 12월 9일 게재확정

또한 원자력 발전소, 대규모 댐 및 화학공장을 비롯한 사회 기반 시설도 지진재해에 거의 무방비로 놓여 있다고 할 수 있다.

따라서 이제는 국내 지진에 대해서도 경각심을 갖고 미리 미리 예측하고 이를 바탕으로 사전에 대비하여 인적, 물적 피해발생을 방지할 필요가 있다. 본 논문에서는 국내 지진을 효과적으로 예측하고 분석하는 기법을 개발하는데 그 목적이 있다. 국내외 지진 예측 기법에 대한 문헌 분석이 이루어지며 이의 단점을 보완하여 더 효율적인 기법 개발에 중점을 둔다. 서로 상이한 유형의 지진 자료를 예측에 활용할 수 있도록 상호연관도를 이용한 베이지안 예측기법 모형을 개발한다.

## 2. 연구에 대한 이론적 배경

### 2.1. 국외 연구

국외 연구는 크게 기존의 개발된 방식을 특정지역의 지진 예측에 적용하는 사례와 요인 값 분석 결과를 활용하는 것을 들 수 있다. 기존 방식 적용 사례로는 Rotwain, Novikova, 1999[16], Kossobokov, Keilis-Borok, 1990[13] 등의 CN algorithm, Kossobokov et al., 1999[14] 의 M8 algorithm, Colombo, Gitisde Franco [11] 의 GEO 2.5 system 활용 등이 있다.

요인값 분석 결과의 활용예로는 지하수 수위의 활용한 Scholz et al., [17]; Arabelos et al., 2001[10]의 연구, 수은 자료 및 라돈 자료를 활용한 Singh et al., 1999[18]의 연구, 초기 이상인자 활동 분석을 한 Zmazek et al., 2002[29], Sultankhodajev, 1984[19], Wakita, Nakamura, and Sano, 1988[21], Teng, 1980[20] 등의 연구를 꼽을 수 있다. 위 예외에 많은 연구들이 지진과 관련된 여러 인자들의 값의 변화와 지진 발생 간의 관계를 파악해 내려는 것에 중점을 두고 있으며 (Vere-Jones, 1970[21]), 실제적으로 Wyss, 2001[23]; Hatheway, 1996[12] 등은 지진 예측이 쉽지 않음에 대해서도 언급하고 있다.

### 2.2. 국내 연구

이기화(1998), 이진희(2004)는 역사 지진 자료를 4단계 진도 구분으로 정리하였으며 지진 활동의 시간적 변화를 기술하였다[4], [6].

박수희(1969), 이기화, 정희욱(1980)은 한반도의 유감 지진과 계측지진 자료를 분석 하였으며[3], [5], 서정희(1977), 김소구(1978), 정봉일, 이기화, 한영우(1980), 김옥준(1980), 김상조(1980), 이태욱(1983) 등은 역사 지진

자료 및 계측지진 자료를 조사하여 진앙지, 진도, 위험도등을 조사하였다[8], [9].

이진희, 경제복(1999)은 통계적 지진 모델을 구축하였으며 위험도를 확률론적으로 표시 하였으며 김윤신, 이철민, 이승일(2003)은 라돈방사농도와 지진 발생간의 상관분석을 하였다[2], [7].

이태욱(1983)은 1905년도 이후의 계측자료를 정리 하였으며 과거 발생 빈도를 평균치 개념으로 설명하였고, 이기화(1998), 이태욱(1983)은 Gutenberg-Richter 관계식의 상수를 추정하였다[4], [8].

### 2.3. 국내외 연구 분석

국내 연구의 일부는 역사지진 자료와 계기 지진 자료의 불완전성 정도를 무시 한 채 동일한 개념으로 활용되고 있다.

아래 Gutenberg-Richter 의 규모와 발생빈도간의 관계식이 상당히 빈번히 인용되고 있으며 이 식의 상수 a, b 를 최우도방식(maximum likelihood method) 혹은 기타 추정 방식에 의해 점 추정하는 데 중점이 주어지고 있다.

$$\log N = a - b M$$

M : 진도

N : 특정기간동안 진도 M이상의 지진 발생빈도

a, b : 상수

### 2.4. 효율적인 예측 기법의 제시

국내의 지진은 소형 지진이 증가하는 추세에 있다.

실제로 피해 상황은 중형 혹은 대형 지진에서 주로 발생하기 때문에 우리는 그러한 유형의 지진에 더욱 관심이 있고 따라서 발생하지 않고 있는 대형 지진도 소형 및 중형 지진 자료를 활용해서 효율적으로 예측할 수 있는 모델과 기법 개발이 절실하다.

대다수 연구들은 지진 변수들과 지진 발생간의 상관관계를 규명하는데 중점을 두고있다. 그러나 고려해야 할 변수의 수는 상당히 많고 변수들 간에는 교호작용도 존재하며 변수 값 확인을 위해 지하 깊숙이 접근이 거의 불가능하기 때문에 이를 규명하는 것은 실제로 불가능에 가까우리 만큼 어려운 작업이다. 또한 극히 일부 입수된 자료의 상관분석을 통해 이루어진 지진 발생예측은 그 정확성에서 의심 받지 않을 수 없다. 따라서 변수와의 상관분석 기법을 넘어 데이터의 변동을 파악해 일정기간 내 지진 발생 가능성 예측 및 발생시점, 강도, 재해 등의 예측에 중점을 두는 것도 실효

성 있는 접근 방법이다.

본 연구를 통해 베이지안 기법을 활용하여 모델 파라미터에 내포된 불확실성 정도를 그대로 반영시키며 시간에 따라 달라지는 정보를 그 즉시 반영 할 수 있고 경미한 지진 발생 자료를 통해 치명적 지진 발생도 예측할 수 있는 기법을 개발한다. 또한 상호연관도(Influence Diagram)의 그래픽 기법을 베이지안 기법 적용에 응용, 보조하여 국내 지진 발생에 대해 통계적으로 신뢰할만한 예측이 가능한 모델을 구축한다.

### 3. 예측 모형 개발

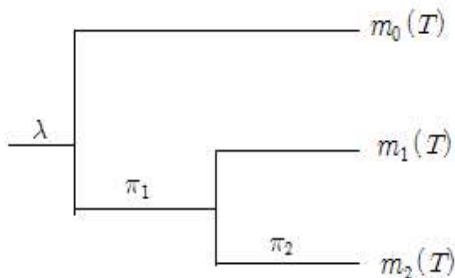
#### 3.1. 상호연관도를 이용한 베이지안 예측 모형

현재 지진의 강도를 나타내는 데에는 전 세계적으로 리히터 진도가 가장 많이 사용되고 있다. 개략적인 분류는 진도가 4.2 이내이면 일부 실내에 있는 사람만 지진을 느끼고 진도가 4.2 이상 5.0 이내까지는 창문과 문이 흔들리고 거의 모든 사람이 지진을 느끼게 된다.

그리고 진도가 5.0 이상이면 건물에 피해가 생기기 시작한다. 따라서 본 논문에서는 진도 4.2 이내의 지진을 소형, 진도 4.2 이상 5.0 이내의 지진을 중형, 진도 5.0이상의 지진을 대형지진으로 분류한다. 물론 이 분류는 다분히 주관적이며 분류의 구분이 달라진다 하더라도 이론의 전개에는 문제가 없다.

그림 2는 여러 유형의 지진 사고를 나타내는 사건가지(Event Tree)이다. 지진 사고의 유형을 진도에 따라 소형, 중형, 대형으로 분류한다.

여기서  $\lambda$  는 총 지진의 발생율을 나타내며  $\pi_1$  과  $\pi_2$  는 중형, 대형 지진으로 확산되는 확률을 나타낸다.  $m_0(T)$ ,  $m_1(T)$ , and  $m_2(T)$  는 (0, T) 기간 중 발생하는 소형, 중형, 대형 지진의 수를 나타낸다. 그렇다면 새로운 계수  $n(T)$ 를 정의할 때 아래의 관계가 성립한다.



<그림 2> 지진 발생 및 확산을 나타내는 사건가지

$$n_2(T) = m_2(T)$$

$$n_1(T) = m_1(T) + m_2(T)$$

$$n_0(T) = m_0(T) + m_1(T) + m_2(T)$$

$n_j(T)$  는 수준  $j$ ,  $j=0,1,2$ , 의 지진 수를 나타내며 위에서 보듯이 수준 0 지진 수는 모든 유형의 지진 수를 포함하고 수준 1의 지진 수는 중형과 대형 지진 수, 수준 2의 지진 수는 대형 지진 수를 나타낸다. 비슷한 개념으로  $x_j$ ,  $j=0,1,2$ , 를 수준  $j$ 의 지진이 발생할 때까지의 시간을 나타내는 변수로 정의한다.

그림 2의 사건 가지는 통계적으로 동일한 상호연관도로 변형될 수 있으며 이는 그림 3에 도시되어 있다.

상호연관도의 자세한 부분은 Oliver and Yang, 1990[15] 을 참조할 수 있다.

베이지안 기법에 따라 지진 발생률과 확산 확률을 나타내는 모델 파라미터에 대한 사전 분포를 가정하고 지진 수에 대한 우도를 가정한다. 자료를 관측한 후에는 자료에 입각한 사후분포를 구하는데 이는 상호연관도에서 회살표 방향전환(arc reversal)과 통계적으로 동일하다.

$$p(\lambda, \pi_1, \pi_2 | n_0(T), n_1(T), n_2(T)) =$$

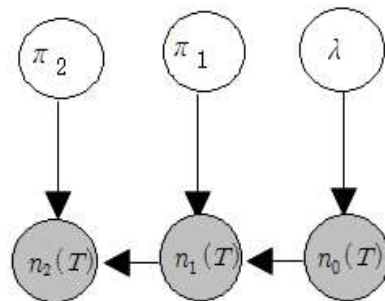
$$p(\lambda | n_0(T)) p(\pi_1 | n_0(T), n_1(T)) p(\pi_2 | n_1(T), n_2(T)) \quad (1)$$

자료 관측 후의 상호연관도는 그림 4에 나와 있다.

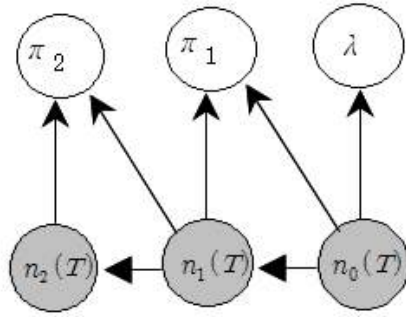
다음 번 지진까지의 시간,  $x_j$ , 에 관한 예측분포는 관측 불가능한 모델 파라미터를 적분 소거함으로써 구할 수 있다. 이는 상호연관도에서 node 소거 (node absorption) 에 해당한다.

$$p(x_j | n_0(T), n_1(T), n_2(T)) =$$

$$\int p(x_j | \lambda, \pi_1, \pi_2) p(\lambda, \pi_1, \pi_2 | n_0(T), n_1(T), n_2(T)) \quad (2)$$



<그림 3> 그림2와 통계적으로 동일한 상호연관도



<그림 4> 자료관측 후의 상호연관도

$\Phi$  를 모델 파라미터들을 나타내는 벡터( $\lambda, \pi_1, \pi_2$ ),  $x$  를 다음 번 지진까지의 벡터 시간( $x_0, x_1, x_2$ ) 이라하면 식 (2)는 아래 식 (3)과 같이 다시 쓸 수 있다;

$$p(x_j | n_0(T), n_1(T), n_2(T)) = \int \dots \int p(x | \Phi) p(\Phi | I) d\Phi \quad (3)$$

식 (3)에서 보는 바와 같이 다음 번 지진 발생까지의 시간은 관측 불가능한 모델 파라미터들을 적분 소거하고 관측된 자료에만 입각하여 구해짐을 알 수 있다.

### 3.2. 데이터 분석 및 예측

1979년도부터 년도별로 발생한 각 유형별 지진 수는 표 1에 정리되어 있다.

표 1의 년도별 지진 발생 수를 꺾은선 그래프로 그린 그림이 그림 5에 있다.

아래 그림 5에서 보는바와 같이 1989년부터 분명히 지진의 발생 빈도가 높아지고 있음을 알 수 있다.

그림 2의 예측 모형에서 발생 빈도를 나타내는 모델 파라미터  $\lambda$  의 사전 분포를 파라미터  $\alpha, \beta$ 를 갖는 감마 분포로 가정한다:

$$\lambda \sim \Gamma(\alpha, \beta)$$

$$p(\lambda) = \frac{\beta(\beta\lambda)^{\alpha-1} e^{-\beta\lambda}}{\Gamma(\alpha)}$$

감마 분포는  $\alpha, \beta$  의 값에 따라 상당히 유연한 분포이며 사고 발생률을 잘 설명할 수 있다는 것이 이미 밝혀져 있다.[Yang(1990)]

파라미터  $\lambda$  가 주어졌을 경우 단위 시간동안 지진의 발생 건수  $n(T | \lambda)$  의 우도는  $\lambda$  를 평균으로 하는 포아송 분포로 가정된다. 또한 보다 심각한 지진으로 확산되는 확률  $\pi_j, j=1, 2$  의 사전 분포는  $a_j, b_j, j=1, 2$

를 파라미터로 갖는 베타 분포로 가정 된다;

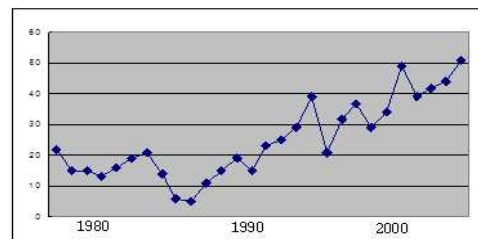
$$\pi_j \sim Be(a_j, b_j)$$

$$p(\pi_j) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \pi_j^{a-1} (1-\pi_j)^{b-1}$$

베타 분포는  $a, b$  의 값에 따라 0 과 1 사이에서 거의 모든 모양의 분포를 다 만들어 낼 수 있기 때문에 확률에 대한 사전 분포로서 가장 적절하다.

<표 1> 각 유형별 지진 수 (기상청 자료)

년도	소형	중형	대형	계
1979	22	0	0	22
1980	14	1	0	15
1981	14	1	0	15
1982	11	2	0	13
1983	16	0	0	16
1984	19	0	0	19
1985	21	0	0	21
1986	14	0	0	14
1987	6	0	0	6
1988	5	0	0	5
1989	11	0	0	11
1990	15	0	0	15
1991	19	0	0	19
1992	14	1	0	15
1993	22	1	0	23
1994	22	3	0	25
1995	29	0	0	29
1996	38	1	0	39
1997	21	0	0	21
1998	32	0	0	32
1999	37	0	0	37
2000	29	0	0	29
2001	34	0	0	34
2002	49	0	0	49
2003	37	2	0	39
2004	41	1	0	42
2005	42	2	0	44
2006	51	0	0	51
2007	4	1	0	5



<그림 5> 년도별 지진 발생 추이

전 수준 단계의 지진 수와 확산 확률이 주어졌을 경우 단위 시간 동안 발생하는 보다 심각한 지진의 발생 건수  $n_j(T|n_{j-1}, \pi_j)$  의 우도는 이항분포를 따른다고 가정한다.

사전 분포의  $\alpha, \beta$  와  $a_j, b_j, j=1, 2$ , 의 값을 추정하기 위해 지진 자료 중 1996년까지의 관측치를 이용하고 그 이후의 자료로 실시간 보정해가는 방법을 쓴다.

$\alpha, \beta$  와  $a_1, b_1$  의 값은 관측치들의 평균과 표준편차가 사전분포의 평균, 표준 편차와 흡사해지도록 2원 1차 방정식을 세워 푸는 방식으로 구한다.  $a_2, b_2$  의 값은 국내에 아직 대형 지진이 관측되지 않았기 때문에 추정하는데 어려움이 있다. 그러나 전 세계적으로 볼 때 대형 지진의 수는 중형지진 수의 약 1%정도에 해당하고 이러한 사전 지식을 반영하고 큰 분산 값을 갖도록 사전 분포를 가정한다. 확실치 않은 부분은 큰 분산 값으로 나타내지며 이후 자료가 입수 되는대로 실시간 보정되어진다. 이렇게 구해진 모델 파라미터의 사전 분포는 아래와 같다;

$$\lambda \sim \Gamma(4.93, 0.275)$$

$$\pi_1 \sim Be(0.375542, 10.80129)$$

$$\pi_2 \sim Be(0.1, 10)$$

이러한 사전 분포는 지진 자료가 입수 되는대로 실시간 보정된다.  $\lambda$  가 파라미터  $\alpha, \beta$  를 갖는 감마 분포를 따르고  $n(T)|\lambda$  의 우도가 포아송 분포인 경우에  $\lambda$  의 사후분포  $p(\lambda|n(T))$  는 식 (1)과 그림 3에 의해 구해지는데 이는 또다시 감마 분포가 되고 감마 분포의 사후 파라미터  $\alpha'$  과  $\beta'$  은 아래와 같이 구해진다;

$$\begin{aligned} \alpha' &= \alpha + n(T) \\ \beta' &= \beta + T \end{aligned}$$

지진 자료가 관측 되는대로, 시간이 흐르는 대로 실시간 보정되는 전체 지진 발생률  $\lambda$  의 평균값 변화가 표 2 에 나와 있다. 1996년도에 우리가 가정한 파라미터 값은 한 해 지진 자료 관측한 후 1997년도에 그 분산이 급격히 감소함을 볼 수 있다.

전체 지진 발생률의 사전 분포,  $\lambda$ , 는  $\Gamma(4.93, 0.275)$  를 따르던 것이 2006년까지의 자료 입수 후 아래와 같이 된다.

$$\lambda|n(T) \sim \Gamma(382.93, 10.275)$$

중형 및 대형 지진 확산 확률  $\pi_1$  과  $\pi_2$  도 역시 실시간 보정되는데  $n_j(T|n_{j-1}, \pi_j)$  의 우도가 이항분포를 따르는 경우 지진 확산 확률의 사후분포,  $(\pi_j|n_j(T), n_{j-1}(T))$ , 도 아래 파라미터를 갖는 베타분포가 된다:

$$\begin{aligned} a_j &= a_{j-1} + n_j(T) \\ b_j &= b_{j-1} + n_{j-1}(T) - n_j(T) \end{aligned}$$

이에 따라 중형 및 대형 지진으로의 확산확률,  $\pi_1, \pi_2$ , 의 사후 분포는 아래와 같이 보정된다;

$$\pi_1|n(T), n_1(T) \sim Be(5.375542, 378.80129)$$

$$\pi_2|n_1(T), n_2(T) \sim Be(0.1, 15)$$

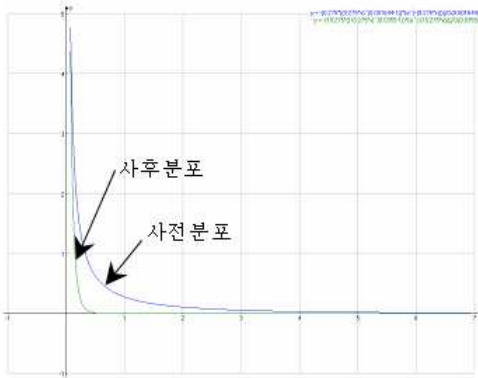
중형 및 대형 지진 발생률,  $\lambda_1, \lambda_2$  는 각각  $\lambda\pi_1$  과  $\lambda\pi_2$  로 표현되며 감마 분포와 베타분포의 곱으로 표현되는 분포는 closed form 으로 구할 수가 없고 수치 적 분만으로 그 표현이 가능하다. 그러나  $\pi$  가 따르는 베타분포의 분산은  $\lambda$  가 따르는 감마분포의 분산에 비해 극히 작기 때문에  $\pi$  의 분포를 거의 상수로 보아도 무방하다. 이 경우 감마 분포에 상수를 곱한 분포는 또 다른 감마 분포가 되기 때문에 우리는 중형 및 대형 지진 발생률의 분포도 closed form 이 보장되는 감마 분포로 가정할 수 있다. 대형 지진의 발생률  $\lambda_2$  의 사전 및 사후 분포는 아래와 같이 구해진다;

$$\lambda_2 \sim \Gamma(0.001644, 0.275)$$

$$\lambda_2|n(T) \sim \Gamma(0.0355, 10.275)$$

<표 2 > 전체 지진 발생률의 년도별 변화

년도	$\alpha$	$\beta$	평균	분산
1996	4.930	0.275	17.927	65.190
1997	25.930	1.275	20.337	15.951
1998	57.930	2.275	25.464	11.193
1999	94.930	3.275	28.986	8.851
2000	123.930	4.275	28.989	6.781
2001	157.930	5.275	29.939	5.676
2002	206.930	6.275	32.977	5.255
2003	245.930	7.275	33.805	4.647
2004	287.930	8.275	34.795	4.205
2005	331.930	9.275	35.788	3.859
2006	382.930	10.275	37.268	3.627



<그림 6> 대형지진 발생률의 사전 및 사후분포

그림 6에서 보는 바와 같이 대형사고의 사후 지진 발생률의 분포는 사전 지진 발생률의 분포에 비해 산포가 많이 감소했음을 알 수 있다. 이는그간 관측한 자료로 인해 불확실성이 감소 했음을 반영하는 것이다.

대형 지진의 발생률,  $\lambda_2$ , 는  $\lambda_2 = \lambda \pi_1 \pi_2$  에 의해 결정되는데  $\lambda$ 의 사후 분포는 그 평균이 늘었으나  $\pi_1$  과  $\pi_2$  의 사후 분포의 평균이 감소함으로 인해 그림 6 와 같은 결과가 나타나고 있다.

확연히 국내 지진의 발생 빈도가 높아지고 있음을 알 수 있으며 이직은 대형 지진의 발생이 다가오고 있다는 뚜렷한 증거는 없으나 중형 지진의 보다 잦은 발생이 이어지면 이를 통해 대형 지진의 발생 가능성이 따라서 높아짐을 예측할 수 있고 본 논문은 그러한 상황의 구체적 예측을 가능하게 한다.

#### 4. 결론

국내 지진의 발생률은 현저하게 높아지고 있다. 다행히 건물 및 인명 피해를 수반하는 대형 지진은 아직 탐지가 되지 않고 있어 소형 지진의 발생률은 높아지지만 대형 지진의 발생률은 약간 감소 추세에 있다.

특이할만한 것은 앞으로도 당분간 대형 지진의 발생이 없다 하더라도 중형지진의 발생으로 인해 중, 대형 지진으로의 발전 확률  $\pi_1$  이 높아지고 이로 인해 대형 사고의 발생률  $\lambda_2$  도 더 높게 보정 될 수 있음을 알 수 있다.

일정한 유형의 지진을 예측하기 위해 그와 동일한 유형의 지진 자료만을 활용하는 예측기법에 반해 본 논문에서는 소형, 중형 지진 발생 자료 속에 있는 정보를 효율적으로 활용하여 대형 지진의 발생을 예측하고 있다. 따라서 국내에서 한 번도 관측되지 않은 대형 지진의 예측이 소형, 중형 지진의 발생 자료를 실시간

활용하여 이루어 질 수 있는 기법을 개발한데 그 의미가 있다.

본 기법은 약간의 변형을 통해 홍수, 가뭄 등의 자연재해 예측에도 확장 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 위해 서로 다른 사전 분포와 우도의 분석 기법에 관한 추가 연구가 필요하며 사후분포가 closed form 으로 나타날 수 없는 경우 효과적인 수치적분 및 approximation 에 대한 연구도 필요할 것으로 보인다.

#### 5. 참고 문헌

- [1] 경제복, “한반도의 지진자료의 불완전성에 대한 통계적 분석”, Journal of Korean Earth Science Society, 14권 4호(1993): 492-499
- [2] 김윤신, 이철민, 이승일, “라돈방사능농도의 측정을 통한 지진발생 예측에 관한 연구”, 한국 환경 학회 지, 12권 6호 (2003): 677-688
- [3] 박수희, “한반도의 유감 지진”, 기상학회지, 5권 1호 (1969): 45-57
- [4] 이기화, “한반도의 역사지진자료”, 지구물리, 1권 1호(1998): 3-22
- [5] 이기화, 정희욱, “A study of instrumental earthquake data of the Korean Peninsula”, Journal of the geological Society of Korea, 16권(1980): 32-45
- [6] 이기화, 이진희, “경상분지에서 발생한 역사지진을 이용한 지진예지 가능성”, 지구물리, 7권 2호(2004): 77-87
- [7] 이진희, 경제복, 1999, “Analysis of Seismin Risk in the Middle Part of South Korea”, Journal of the geological Society of Korea, 20권 4호(1999): 411-422
- [8] 이태욱, 1983, “한반도 계기지진 Data(1905 ~ 1982)의 분석”, Journal of Korean E.S.E.S., 4권 1호 (1983): 9-22
- [9] 정봉일, 1981, “한국의 고지진에 관한 연구”, 지질학회지, 17권 4호(1981): 257-268
- [10] Arabelos, D., Asteriadis, G., Contadakis, M., Zioutas, G., Xu, D., Zhang, C., Zheng, B. “The use of an outlier detecting method in time series of continuous daily measurements of underground water level and temperature in earthquake prediction investigation”, Tectonophysics 338권(2001): 315-323
- [11] Colombo, D., Gitis, V., de Franco, R., “Application of pattern recognition techniques to long-term earthquake prediction in central Costa Rica”,

- Engineering Geology 48권(1997): 7-18
- [12] Hatheway, Allen W., "Book Review of Fundamentals of Earthquake Prediction by C. Lomnitz, 1994", Wiley, Chichester, Engineering Geology 43권(1996): 81-82
- [13] Kossobokov, V.G, Keilis-Borok, V.I, Smith, S.W., "Localization of intermediate term earthquake prediction", J. Geophys. Res. 95권(1990): 1973-1972
- [14] Kossobokov, V.G, Romashkova, L.L, Keilis-Borok, V.I, Healy, J.H., "Testing earthquake prediction algorithms: statistically significant advance prediction of the largest earthquakes in the Circum-Pacific, 1992-1997", Physics of the Earth and Planetary Interiors 111권(1999): 187-196
- [15] Oliver, R.M, and Yang, Heejoong, "Bayesian Updating of Event Tree Parameters," Influence Diagrams, Belief Nets and Decision Analysis, edited by Oliver, R.M and Smith, J.Q, John Wiley & Sons(1990): 277-296.
- [16] Rotwain, I., Novikova, O., "Performance of the earthquake prediction algorithm CN in 22 regions of the world", Physics of the Earth and Planetary Interiors 111권(1999): 207-213
- [17] Scholz, C.H, Sykes, L.R., Agrawal, Y.P., 1973, "Earthquake prediction : a physical basis", Science 181, p.803-810
- [18] Singh, M., Kumar, M., Jain, R.K., Chatrath, R.P., 1999, Radon ground water related to seismic events, Radiat. Meas. 30, p.465-469
- [19] Sultankhodajev, A.N, 1984, Hydrogeoseismic precursors to earthquakes. In: Earthquake prediction, UNESCO, Paris, p.181-191
- [20] Teng, T.L., 1980, Some recent studies on groundwater radon content as an earthquake precursor, J. Geophys. Res. 85, p.3089-3099
- [21] Vere-Jones, D., 1970, Stochastic models for earthquake occurrence, J. of Roy. Statist. Soc., B32 p.1-62
- [22] Wakita, H., Nakamura, Y., sano, Y., 1988, Short-term and intermediate-term geochemical precursors. Pure Appl. Geophys. 126, p.267-278
- [23] Wyss, Max, 2001, Why is earthquake prediction research not progressing faster?, Tectonophysics, Vol.338, p.217-223
- [24] Yang, Heejoong et.al. A Bayesian Approach to Prediction of System failure Rates by Criticalities under Event Trees, 1999, International journal of Production Economics, vol.60, p.623-628
- [25] Yang, Heejoong, 1999, Approximation Method for failure Rates in a General Event Tree, 공업경영학회지, 제 22권 제 52호, p.181-189
- [26] Yang, Heejoong, 2000, Forecasting and Deciding When to Shutdown a Nuclear Power Plant to Prevent a Severe Accident, 산업경영시스템학회지, 제23권 제56호, p.25-31
- [28] Yang, Heejoong, 2000, Deciding the Optimal Shutdown time of a Nuclear Power Plant, IE Interfaces vol. 13, No.2, p.211-216
- [29] Zmazek, B., Todorovski, L., Dzeroski, S., Vaupotic, J., Kobal, I., Application of decision trees to the analysis of soil radon data for earthquake prediction, Applied Radiation and Isotopes, Vol.58, p.697-706
- [30] [http://www.kma.go.kr/neis/neis\\_03\\_02\\_01](http://www.kma.go.kr/neis/neis_03_02_01)
- [31] [http://www.kma.go.kr/neis/neis\\_03\\_02\\_02](http://www.kma.go.kr/neis/neis_03_02_02)

## 저 자 소 개

### 양 회 중



서울대학교를 졸업하고 Univ. of Texas at Arlington 에서 산업공학 석사, University of California, Berkeley에서 산업공학박사를 받았다. 1996-1997에 Naval Post graduate School에서 방문교수로 활동하였으며 현재 청주대학교 산업공학과 교수로 재직 중이다.

주요 관심분야는 품질경영과 안전 사고 예측이다.

주소: 충북 청주시 상당구 내덕동 36 청주대학교 산업공학과