

## 단층지진원 확률론적 지진재해도 분석에 관한 고찰 Review on Probabilistic Seismic Hazard Analysis of Capable Faults

최원학\*                      연관희\*                      장천중\*  
Choi, Weon-Hack          Yun, Kwan-Hee              Chang, Chun-Joong

### ABSTRACT

The probabilistic seismic hazard analysis for engineering needs several active fault parameters as input data. Fault slip rates, the segmentation model for each fault, and the date of the most recent large earthquake in seismic hazard analysis are the critical pieces of information required to characterize behavior of the faults. Slip rates provide a basis for calculating earthquake recurrence intervals. Segmentation models define potential rupture lengths and are inputs to earthquake magnitude. The most recent event is used in time-dependent probability calculations. These data were assembled by expert source-characterization groups consisting of geologists, geophysicists, and seismologists evaluating the information available for each fault. The procedures to prepare inputs for seismic hazard are illustrated with possible segmentation scenarios of capable fault models and the seismic hazards are evaluated to see the implication of considering capable faults models.

### 1. 서론

대규모 지진 발생으로 인한 재해는 많은 재산피해와 인명손실로 이어질 수 있으므로, 이에 대한 대비가 매우 중요하다. 따라서 지진위험도를 평가하여 내진설계에 반영하고 장래 지진발생 가능성을 예측하여 대비책을 강구할 필요가 있다. 하지만, 지진발생 속성상 지진원 과정이 초기조건인 작은 변화에 너무 민감하므로 현재의 연구결과나 이해에 근거하여 언제, 어디서, 어느 규모로 지진이 발생할 것인지에 대한 정확한 예측을 하는 것은 가능하지 않다고 알려져 있다([1]). 지진에 의한 피해를 줄이기 위해 주요 구조물이나 건축물에 대한 내진설계를 하여 그 목적을 달성할 수 있으나, 내진설계의 기준이 되는 지진발생 규모나 확률에 대한 이해가 선행되어야 경제적인 설계기준이 마련되고 시공될 수 있을 것이다. 또한 지진재해도 분석은 역사 및 계기지진자료를 비롯하여 지진의 규모, 발생빈도 등 지진발생과 관련된 변수와 단층의 길이, 폭, 변위속도, 분절화 모델, 재발주기 등의 단층 지진원 변수를 포함하여 종합적인 평가를 하게 된다.

지진재해도 분석방법에는 크게 결정론적 방법(DSHA, Deterministic Seismic Hazard Analysis)과 확률론적 방법(PSHA, Probabilistic Seismic Hazard Analysis)이 있으며 각각의 방법은 장단점이 있다([2]). 결정론적 방법 수행 단계는 1. 부지에 영향을 줄 수 있는 중요한 모든 잠재지진원의 위치와 특성을 작성, 각 지진원에 대해 최대신뢰지진(MCE)을 부여하고, 2. 지진규모의 함수로서 부지지반운동변수를 평가하기 위해 적당한 감쇄식 선택, 지진원에서 부지까지 거리 및 다양한 부지조건을 선택한 후, 3. 부지에서 지진응답을 계산한다. 확률론적 방법에서는 1,2단계가 결정론적 방법과 동일하나 3단계에서 각 지진원에 대해 지진발생빈도는 지진정보로부터 결정하고, 이때 Gutenberg-Richter 규모-재발관계식이 가장 일반적으로 이용된다. 이 관계식으로부터 얻은 b-line은 여러 규모의 지진발생의 상대적 비율을 나타내며, 기본적인 PSHA에서 년 초과확률을 가진 exponential-magnitude 분포를 개발하고 지진원으로부터 운동은 부지에 대해 확률수준으로 나타내 이를 결합하는 과정으로 이루어진다. 여기에서는 지진재해도 분석시, 단층지진원의 입력요소에 대하여 알아보고 확률론적 지진재해도 분석의 경우에 대해 그 입력요소의 적용방법에 대한 검토를 수행한다.

\* 한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정회원

## 2. 지진재해도 분석의 단층 입력자료

단층은 개별적으로(individually) 또는 집단적으로(in group) 파열될 수 있는 분절의 연속(또는 단일 분절)으로서 특성을 나타낼 수 있고, 단층분절은 길이(또는 면적), 지진 규모의 발생빈도를 기술하는 확률밀도함수[ $f(m)$ ] 및 장기적 변위속도(slip rate)로 특성화된다. 지진으로 인한 모멘트 방출속도와 단층상에 누적된 지진모멘트간의 균형에 의하여 단층상에서 지진 발생율을 추출하는 것이 가능하다. 단층을 따라서 발생하는 지진의 크기는 인지하기 어려운 매우 작은 규모 사건에서 전체 단층 분절이 파열되는 아주 파괴적인 사건까지의 범위에 이른다. 최소 규모( $m^0$ )는 구조물에 손상을 주는 지반운동을 일으키리라고 기대되는 최소 수준의 에너지 방출과 비교할 수 있다. 단층이 일으킬 수 있는 최대 규모지진은 단일사건과 응력강하에서 파열될 수 있는 가능한 최대 단층 면적에 좌우된다. 보통 특정 지체구조 지역내에서는 일정한 응력강하가 가정되는데, 단층면적( $A$ ) 만으로도 규모를 결정할 수 있다. 이러한  $m-A$  관계는 불확실하며 경험적 자료로부터 산정된 확률밀도 함수 예를 들어  $f(m|A)$ 에 의해 나타낼 수 있다.

규모는 면적과 상관되기 때문에 단층을 따라 가능한 단층표면을 특성화할 필요가 있다. 주요 단층에 대하여 단층분절화 개념을 이용하여 수행하며, 단층 분절은 장래 대규모 지진의 위치와 범위를 정의하는 분절에 의해 단층이 구성된다는 것이다.

### 2.1 최소 규모

최소 규모 지진( $m^0$ )은 구조물에 손상을 줄 수 있는 지반운동을 일으킬 것으로 기대되는 가장 작은 사건이다. 여러 등급의 구조물에 대한  $m^0$ 의 가장 적절한 값은 알려지지 않았으나, 약 5.0 정도를 대개 취한다.

### 2.2 단층 분절화

대규모 지진확률에 대한 광역적 평가는 분절의 연속체로서 단층 특성에 기초하고 있으며, 분절은 개별적으로 또는 이웃한 그룹내에서 파열을 가정한다. 단층 분절은 장래 지진의 위치와 범위를 정의한다고 가정하고 지질 및 지구물리 자료와 과거 지진에서의 파열에 근거하여 추정한다. California의 경우, 활성단층에 대하여 단층의 특성을 알 수 있는 정도에 따라 A, B, C 단층으로 분류하여 재해도 모델에 사용하였다([3]). 즉, 지진원 단층에 대해, "A" 단층은 San Andreas 단층계와 관련된  $s > 5\text{mm/yr}$ 인 주요 주향이동단층, "B" 단층은 변위속도  $s > 0.1\text{mm/yr}$ 인 상태의 대부분의 나머지 단층이며 주향이동과 역단층을 모두 포함하고, "C" 단층은 정의가 잘되지 않는 구조(예, blind thrust)와 배경지진활동을 나타낸다([3]). 하지만, 지표파괴 역단층 지진원에 대한 이용가능한 자료로서 분절화, 변위 또는 마지막 지진의 시기에 대한 정확한 자료를 얻기가 매우 어렵다는 것을 염두해 두어야 한다. ([4]).

### 2.3 규모-면적 규모화 관계식(Magnitude-Area Scaling Relationships)

규모-면적 규모화 관계식은 파열된 단층분절의 크기(다시 말해 "면적")와 사건으로부터의 에너지 방출("규모")을 서로 관련시키는데 이용된다. 에너지 방출은 또한 파열을 가로지르는 평균응력 감소 또는 응력강하에 의존하기 때문에, 규모-면적 관계에서는 일정한 응력강하를 가정한다.

Wells and Coppersmith(1994)는 421개 지진 database에서 규모-면적관계식을 개발하기 위해 244개 지진단층을 이용하였다([5]). 이 database의 지진은 활성지체구조지역과 판중양부 지역에서의 천부 진원(진원깊이  $< 40\text{km}$ ) 사건으로  $m = 4.07 + 0.98 \cdot \log(A)$ 의 관계식이 도출되었다. 이 회귀식은 모든 파열기작(주향이동단층, 역단층, 정단층)에 대하여 적용할 수 있지만, 기작고유의 회귀식간에 특별한 변화를 찾기 어렵다. 최근 연구에 의하면, 이 회귀식이 대규모( $M \sim 7$ ) 사건에 대해 규모가 작게 반영되어,  $m = k + \log(A)$ 의 새로운 회귀식을 도출하였고, 여기에서  $k=4.2-4.3$ 이다([3]).

## 3. 지진 규모-빈도 관계식

지진원에 대한 위치와 규모범위가 한 번 정해지면, 단층상에서 다른 규모지진의 상대적 빈도(likelihood)와 단층의 지진발생율을 특성화할 필요가 있다. 이러한 모델의 개발은 지진 모멘트 방출이 모멘트 누적(build-up)과 균형을 이루어야 한다고 가정된다. 주어진 단층에 대하여, 모멘트 누적이 변위속도( $s$ )와 비례하고 이는 단층면 양측의 암괴운동에 대한 장기적이고 시간평균 상대속도이다. 규모재발 관계식의 특성화는 다음 두 단계와 관련이 있다 : (1) 규모에 대한 확률밀도함수의 산정,  $f(m)$  (2) 지진발생율 산정.

### 3.1 규모에 대한 확률 밀도 함수

가장 널리 알려진 규모-재발 관계식은 Gutenberg와 Richter(1944)에 의해 개발된 것으로 다년에 걸친 남부 California에서 지진발생 관찰결과에 근거하였다. Gutenberg-Richter 관계식은 다음에서처럼 규모  $> m(v_m)$ 을 가진 지진의 발생의 년 평균 비율과 관련이 있다.

$$\log_{10} v_m = a - bm \quad (1)$$

변수  $b$ 는 여러 규모를 가지는 지진의 상대적 발생 빈도(relative likelihood)에 대한 정보를 포함하고 있으며 전형적으로 약  $b=0.8 \sim 1.0$ 이다. 변수  $a$ 는  $m > 0$ 인 지진의 연간 발생 횟수를 나타낸다.

확률 밀도 함수  $f(m)$ 에 대한 truncated exponential 모델은 Gutenberg-Richter 관계식에 기초하고 있으나 다음 두 가지가 수정되었다 : (1) 자연대수 계수(natural logarithmic coefficients)인  $\beta$ 가 사용되는데 여기에서  $\beta = 2.303b$ 이고 (2) 규모크기는 하한과 상한 경계값, 각각  $m^0$ 와  $m^u$ 에서 잘라진다(truncated). 이 수정된 식을 가지고,  $f(m)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$f(m) = \frac{\beta e^{-\beta(m-m^0)}}{1 - e^{-\beta(m^u-m^0)}} \quad (2)$$

$m^0 = 5$ 와  $m^u = 7.5$ 인 단층에 대한 함수를 그림 1.(a)에 점선으로 표시하였다.

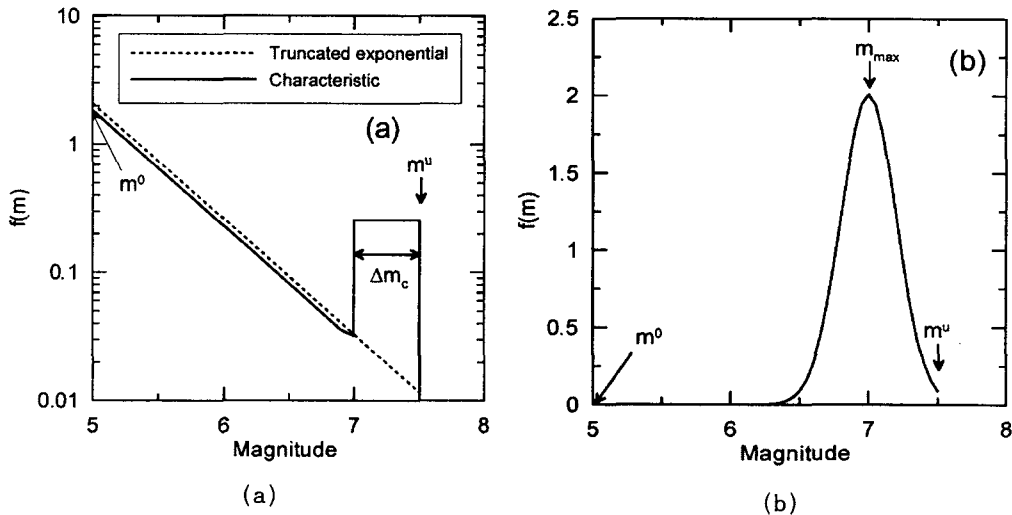


그림 1. 규모에 대한 확률밀도함수,  $f(m)$ ; (a) truncated exponential and characteristic, (b) maximum magnitude.

$f(m)$ 에 대한 특성지진 모델은 Youngs and Coppersmith(1985)에 의해 제안되었는데, 특성사건(characteristic events)의 증가되는 지진발생율을 반영하는 truncated exponential model을 적용할 수 있다([7]). 특성지진 모델의 형태는 그림 1.(a)에 실선으로 표시되어 있다. 특성지진은  $m^u - \Delta m_c$ 에서  $m^u$ 의 규모범위에서 균일하게 분포하지만, 작은 규모의 지진은 지수함수 분포를 따른다. 두 비율 항이 특성지진 모델에 필요한데, 하나는 특성사건에 대한 비율이고, 다른 하나는  $(m^u - \Delta m_c) > m > m^0$ 인 지진에 대한 것이다.

$f(m)$ 의 세 번째 모델은 상대적으로 좁은 규모 범위내에서만 지진을 발생시킬 때 나타나는 단층에 대하여 이용된다. 이 모델은 최대 규모 모델(maximum magnitude model)이라 하며  $f(m)$ 에 대하여 truncated normal 분포로 구성되며  $m^0$ 와  $m^u$ 를 각각 절단 규모(cutoff magnitude), 평균 규모는  $m_{max}$ , 표준편차는  $\sigma_m$ 이다. 이 모델에 대하여  $m^0=5$ ,  $m^u=7.5$ ,  $m_{max}=7.0$ ,  $\sigma_m = 0.2$ 인 예가 그림 1.(b)에 제시되어 있다.

### 3.2 지진발생율

지진발생율을 모델화하기 위하여 일반적으로 두 가지 개념이 이용되는데, 하나는 지진이 Poisson 과정으로 발생한다는 것으로 사건 발생이 장래 사건의 시기에 대한 영향을 주지 않는다. 다른 하나는 시간-예측모델(time-predictable model)로 알려진 것으로 단층상에서 사건의 발생은 응력방출에 따라 장래 지진의 확률을 시간적으로 줄이는 것이다

주어진 단층에서 지진발생의 포아송 비율은  $f(m)$ 에 대한 모델이 선정되면 한 번에 계산될 수 있다. 단층면적(A)를 가정하고 단층 암괴간 마찰계수( $\mu$ )와 변위속도(s)가 알려지면 휴지기 동안 단층상에 누적되는 모멘트( $\dot{M}_0$ )의 비율은

$$\dot{M}_0 = \mu A s \quad (3)$$

Truncated exponential 그리고 maximum magnitude에 대하여, 모멘트 방출은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{M}_0 = v \cdot \int_{m_0}^{m_u} f(m) M_0(m) dm \quad (4)$$

여기에서  $v = m > m_0$ 인 지진의 발생에 대한 포아송 비율이고,  $M_0$ 는 Hanks and Kanamori(1979)의 잘 알려진 관계식  $m$ 과 관련이 있다.

$$M_0 = 10^{1.5m + 16.1} \quad (5)$$

모멘트 방출과 모멘트 누적을 균형을 이룸으로써, 포아송 지진발생율  $v$ 는 쉽게 계산될 수 있다.

특성단층모델은 어떤 의미에서는 복합모델(hybrid)인데 특성지진이 고지진학적 연구를 통하여 결정된 특정 발생을  $v_c$ 로 일어나고 분리된 발생을  $v$ 는 모멘트 균형에 의해  $m_0 \leq m < (m^u - \Delta m_c)$ 에 대하여 결정된다. 이 경우에, 모멘트 누적은 식 (3)을 이용하여 계산하고, 모멘트 방출은 다음과 같다

$$\dot{M}_0 = v \cdot \int_{m_0}^{m^u - \Delta m_c} f(m) M_0(m) dm + v_c \cdot \int_{m^u - \Delta m_c}^{m^u} f(m) M_0(m) dm \quad (6)$$

포아송 발생율  $v$ 은 식 (3)과 (6)에 대입하여 계산된다.

단층상에서 이전의 주요 지진이후에 경과된 시간에 근거하여 장래의 시간 창(time window)동안 지진 확률을 적용하기 위해 이용가능한 여러 가지 시간예측모델이 있다. 이들 모델은 현재부터 특정한 다음 지진까지 시간의 확률분포  $f(t)$ 로 구성되는데, 여기에서  $t$ 는 다음 사건까지의 시간이다. 모델은 특정 크기 사건의 발생속도를 새로 구성하는데 이용되며 실제적으로는 특성 지진과 같은 큰 사건에 이용된다. 그림 2는 시간예측모델을 이용하여 특성사건의 속도를 평가하기 위한  $f(t)$ 의 사용한 예를 보여준다. 그림에서  $f(t)$ 는  $1/v_c$ ( $v_c$ 는 특성사건으로 이 경우에는  $1/300$ 임)의 정규분포로서 취했다. 마지막 사건이후  $t_c = 200$ 년 이 지났다면, 조건 밀도함수  $f(t|t > t_c)$ 를 만들 수 있고, 시간  $\Delta t$  내에 사건의 확률을 보이는 것처럼 계산할 수 있다. 특성 사건의 새로운 속도( $v_{c,sp}$ )도  $\Delta t$ 에 의해 정규화된 확률로써 계산될 수 있다. 그림에서 예를 들면,  $v_{c,sp} = 0.0039$  events/year인 것은  $v_c = 1/300 = 0.0033$  events/year와 대비될 수 있다. 이런 방법으로 적용된 특성지진속도를 가지고, 앞에서 기술된 바와 같이 단층에 대하여 전체적인 모멘트 균형을 진행시킬 수 있다. 이상으로부터, 시간예측모델을 개발하는 주요 단계는  $f(t)$ 의 구성에 있다는 것이 분명하다.

지진주기에 대하여 물리적 근거를 가진 새로운 모델을 이용하여 최근에 연구되었다([3]). 이 모델은 특정 시점에서 단층의 모멘트를 고려하는데, 이는 일정한 속도로 모멘트가 누적되고( $\dot{M}_0 \cdot t$ , 여기에서  $\dot{M}_0$  = 모멘트 누적속도) Brownian 운동에 의해 정의되는 임의성분[ $\epsilon(t)$ ]로부터 계산된다. 임의성분은 표준 Brownian 운동(W)와 non-negative scale parameter,  $\delta$ 의 곱으로 나타난다. 단층상에서 응력을 나타내는 변화 상태[  $Y(t) = \dot{M}_0 t + \epsilon(t)$  ]가 고정된 문턱(threshold) ( $Y$ )에 도달하면 지진이 발생하고, 이 시점에 변화 상태는 고정된 기저상태( $Y_0$ )로 돌아가게 된다. 파괴문턱 [ $f(t)$ ]을 넘는 진행 시간의 확률밀도함수(PDF)는 다음과 같은 Brownian Passage Time(BPT)로써 알려져 있다.

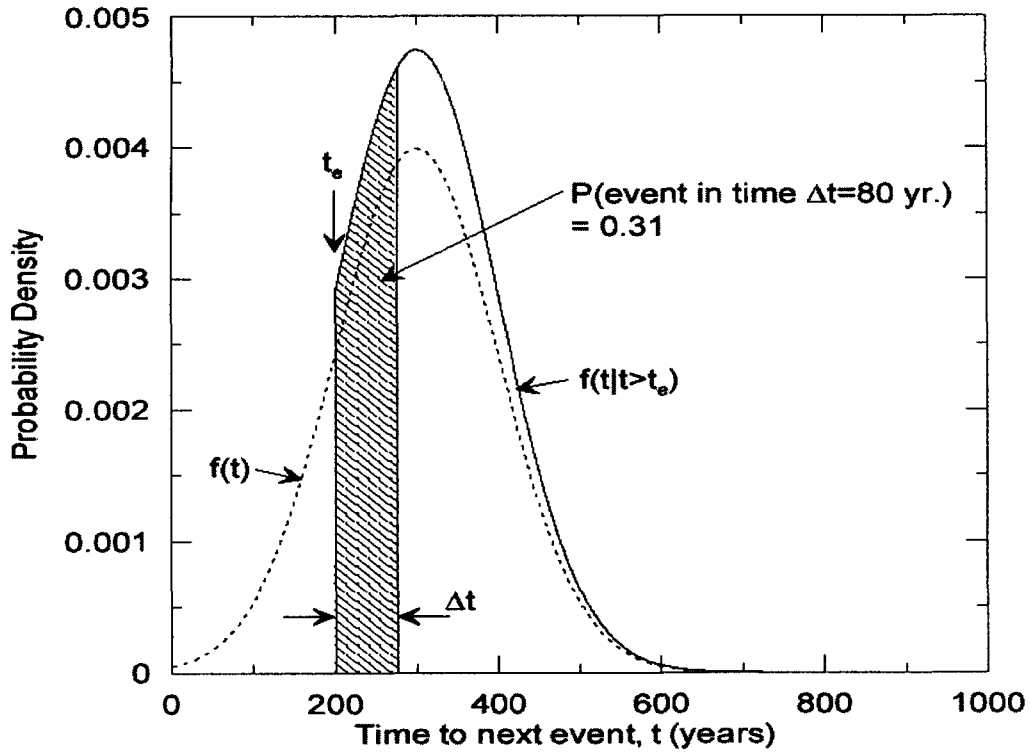


그림 2. 사건확률의 예측을 시간에 맞추는 시간예측 모델 예

$$f(t) = \sqrt{\frac{\mu_t}{2\pi\alpha_t^2 t^3}} \exp\left[-\frac{(t-\mu_t)^2}{2\alpha_t^2 \mu_t t}\right] \quad (7)$$

식 (7)에서  $t$ 는 다음 사건까지의 시간이고, 사건이 일어난 후 제자리로 돌아간다(reset). 변수  $\mu_t$  = 사건간 평균시간 ( $\mu_t = Y_f / \dot{M}_0$ ),  $\alpha_t$  = 사건간 시간 변화의 계수 ( $\alpha_t = \delta / \sqrt{Y_f \dot{M}_0}$ )이다. 변수  $\alpha_t$ 는 단층상에 누적된 지체구조 응력, 단층의 응력과 강도에 있어서 공간변화, 또는 인근 단층과 같은 외부요인으로 인한 응력상태의 교란 등과 연관된 임의성을 나타내는 것으로 해석될 수 있다. 이 함수는  $t=0$ 에서 영의 파괴확률을 나타내고,  $t \rightarrow \infty$ 일 때 유한 파괴확률을 보인다. 파괴에 대한 시간의 “임의성(randomness)”은  $\alpha_t = 1/\sqrt{2}$ 의 제한 값에 이를 때까지  $\alpha_t$ 와 함께 증가하고, 이 점에서 모델은 파괴속도  $\mu_t$ 를 가진 포아송과정과 동일하다. 시간예측 지진발생에 대하여 BPT 모델을 적용을 위해 변수  $\mu_t$ 와  $\alpha_t$ 가 필요하다. 변수  $\mu_t$ 는 일반적으로 고지진 연구에 의한 단층고유특성으로부터 도출된다. 규모로서 특성밀도함수를 가지고 모델화한 단층에 대하여,  $\mu_t$ 는 특성지진의 속도  $v_c$ 와 거의 같다고 볼 수 있다.

#### 4. 가상 단층지진원모델의 여러 시나리오에 대한 지진재해도 계산 예

이상에서 기술한 단층지진원 모델에 대한 지진재해도 계산 과정을 그림 3에 임으로 단층길이, 변위속도등을 가정한 가상 단층지진원 시나리오에 대해 적용해 보았다. 시나리오는 이상에서 기술한 모델을 포함할 수 있도록 다양하게 설정되었다. 그림 3의 (a)에서는 4개의 단층 분절화, 그림 3(b), (c)에서는 3개의 단층 분절화를 가정하였다. 각 지진원의 최대규모는 단층의 폭을 13km로 고정하고 Wells and Coppersmith (1994)의 단층면적-규모 관계식을 이용하여 표 1과 같이 계산하였다. 표 1에서 계산된  $v_c$ ,  $v$ 은 각 단층 분절에 할당된 slip rate을 이용하고 식 (4)를 이용하여 계산되었다. 표 1 시나리오 3의 characteristic model 경우에는 slip rate 이외에  $v_c$ 가 주어져 식 (6)을

이용하여  $\sigma$ 를 계산하였다. 그림 3(c)에는 활성화도  $P_a$  (Probability of Activity)가 각 단층 지진원에 부여되었다. 이는 단층의 활성화도가 불확실할 경우 이를 정량적으로 평가하기 위해 고안된 값으로 결과적으로 표 2와 같은 지진원 조합이 가능해진다.

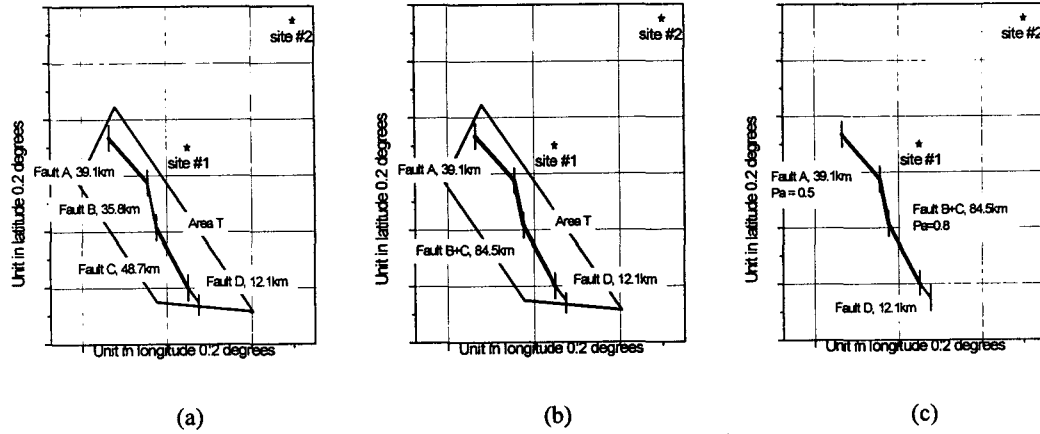


그림 3. 단층 지진원 모델 가상 시나리오

표 1. 그림 3의 단층 지진원 모델에 대한 지진원 특성 평가 결과

Scenario	sources	Type	Length (km)	$P_a$	Max. Mag.	Slip rate (mm/yr)	$u_c$ (1/yr)	a	b	$\frac{u}{(1/yr)}$	$\Delta m_c$
1	Fault A	MM	39.1	1.0	6.7	0.1	1.1E-4	-	-	-	0.01
	Fault B	MM	35.8	1.0	6.6	0.03	3.5E-5	-	-	-	0.01
	Fault C	MM	48.7	1.0	6.8	0.05	5.1E-5	-	-	-	0.01
	Fault D	MM	12.1	1.0	6.2	0.1	2.0E-5	-	-	-	0.01
	Area T		-	1.0	6.0	-	-	2.0	0.9	-	-
2	Fault A	MM	39.1	1.0	6.7	0.1	1.1E-4	-	-	-	0.01
	Fault B+C	TE	84.5	1.0	7.0	0.04	-	1.93	0.9	0.0027	-
	Fault D	MM	12.1	1.0	6.2	0.1	2.0E-5	-	-	-	0.01
	Area T		-	1.0	6.0	-	-	2.0	0.9	-	-
3	Fault A	TE	39.1	0.5	6.7	0.1	-	1.8	0.9	0.002	-
	Fault B+C	CE	84.5	0.8	7.0	0.04	3.1E-5	2.14	0.9	0.004	0.01
	Fault D	TE	12.1	1.0	6.2	0.1	-	1.66	0.9	0.001	-

Shaded area shows predetermined values.

Type : MM=Maximum Magnitude, TE=Truncated Exponential, CE=Characteristics

그림 3에 주어진 단층 지진원모델 가상 시나리오에 대해 지진재해도 분석을 수행한 결과는 그림 4와 같다. 이때 사용된 지반운동감쇠식은 식 (8)과 같다.

$$\ln \text{PGA}(\text{cm/sec}^2) = 0.4 + 1.2 m - 0.76 \ln R - 0.0094 R \quad (8)$$

여기서  $M$  = 국지규모,  $R$  = 진원거리 =  $\sqrt{(R_{epi}^2 + 10^2)}$ 이며,  $\sigma_{\ln \text{PGA}}=0.6$ 으로 계산하였다.

또한 진원 깊이는 일괄적으로 10km로 정하였고, 지진재해도 계산을 위한 최소규모는 5.0으로 하였다. 단층 지진원의 지진재해도 계산을 위한 규모-단층파괴길이 관계식은 Wells and Coppersmith (1994)식을 이용하였으며 단층파괴길이의 대수로그 표준편차는 0.5로 가정하였다.

표 2 그림 3 가상 시나리오 3에 대한 지진원 조합

조합	확률
Fault A+D	0.1 = $0.5*(1-0.8)$
Fault (B+C)+D	0.4 = $(1-0.5)*0.8$
Fault A+(B+C)+D	0.4 = $0.5*0.8$
Fault D	0.1 = $(1-0.5)*(1-0.8)$
합계	1.0

그림 4의 (a), (b)로부터 원거리(site #2)에서는 근거리의 경우보다 시나리오 가정에 따라 지진재해도 차이가 많지 않으며 그림 4의 (c)에는 단층지진원 모델에 따른 지진재해도 계산결과를 나타내는데 대략 다음과 같은 순서로 지진재해도의 크기가 계산되었다.

characteristic > maximum > truncated exponential

그림 4(d)에는 지진원의 활성화 부여에 따른 지진원 조합에 따라 지진재해도 계산결과가 어떻게 달라지는지를 나타내는 그림으로 일반적으로 지진활성도를 지진재해도 계산시 반영하면 지진재해도 결과의 불확실성이 크게 나타난다.

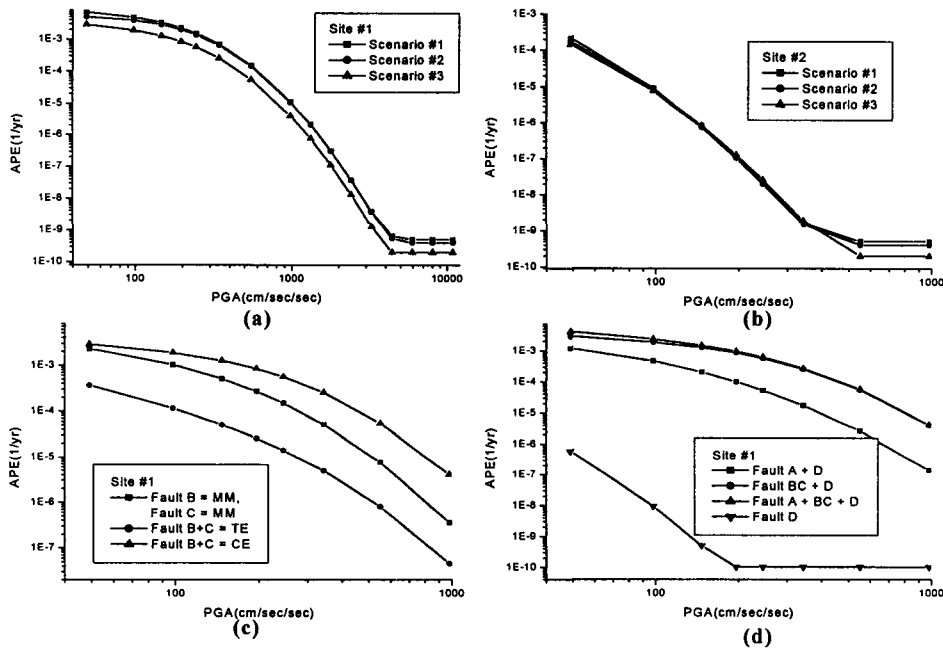


그림 4. 그림 3 가상 단층지진원 모델에 대한 지진재해도 분석 결과

## 7. 결 론

단층활동으로 인한 지진재해도 분석시, 결정론적 방법과 확률론적 방법이 있으며 이들 모두 단층지진원의 특성에 근거를 하고 있다. 확률론적 지진재해도 분석시 단층지진원의 불확실성을 감안하여 단층길이, 폭, 변위속도, b-값 등의 입력자료의 확률분포에 근거하여 분석을 시행한다. 하지

만, 확률론적 분석 결과의 정확도를 향상시키기 위해서는 단층 지진원에 대한 정밀한 조사를 통하여, 단층의 길이, 폭, 변위속도, 분절화모델, 재발주기, 지진발생과의 연관성 등과 같은 단층 지진원 변수에 대한 특성이 잘 정의되어야 한다.

단층 지진원 변수에 따른 지진재해도 결과의 영향을 살펴보기 위해 단층지진원 모델에 대한 가상 시나리오를 작성하고 가상 시나리오 및 단층 지진원 모델에 따른 지진재해도 결과를 비교하여 보았다. 본 연구를 통해 향후 도출되는 활성 단층 조사 결과를 지진재해도 결과에 반영할 수 있게 되었으며, 불확실한 단층 지진 변수 특성을 체계적이고 합리적으로 구조물의 내진안전성 평가에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기 계획사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드린다.

## 8. 참고문헌

- [1] Geller, R.J., (1997), Earthquake prediction : a critical review, *Geophys. J. Int.* 131, pp.425-450.
- [2] Krinitzsky, E.L., (1998), The Hazard in Using Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Engineering, *Environmental and Engineering Geoscience*, Vol. IV, No. 4, pp. 425-443.
- [3] Working Group on California Earthquake Probabilities, (1999), Earthquake probabilities in the San Francisco Bay Region : 2000 to 2030 - A summary of findings, Open File Report 99-517, U.S. Geological Survey.
- [4] Working Group on California Earthquake Probabilities, (1995), Seismic hazards in southern California : Probable earthquakes, 1994-2024, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 85, pp. 379-439.
- [5] Wells, D.L. & Coppersmith, K.J., (1994), New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, pp. 974-1002 .
- [6] Gutenberg, B. and Richter, C.F., (1944), Frequency of earthquakes in California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 34, pp. 1985-1988.
- [7] Youngs, R.R., and Coppersmith, K.J., (1995), Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, pp. 1161-1176.
- [8] Pacific Earthquake Engineering Research Center (2001), Ground Motion Evaluation Procedures for Performance-Based Design, 99.