

## 지진예측 방법의 불확실성에 관한 고찰

홍 갑 표\*

### 1. 서론

공학이란 자연현상을 단순하게 묘사할 수 있는 수학적 모형을 찾아내는 과정이라 할 수 있다. 그러나 복잡한 자연현상을 단순화하는 데에는 현재까지의 학문수준으로서는 해결하지 못하는 미지의 부분이 필연적으로 있어서 자의반 타의반으로 생략되며, 이 부분을 수학적 모형에 추가시키려는 노력이 필요하다. 이 미지의 부분은 용어상으로는 Uncertainty, Randomness, Fuzziness 등으로 표시되고 있는데, 이들은 기본적으로 두가지 특징을 가지고 있다. 하나는 지식과 학문의 발달과 함께 점차 개선될 수 있는 부분과, 또 하나는 지식과 학문이 발달하여도 개선되지 않는 부분이다. 그중에서 개선될 수 없는 부분은 무작위성(randomness)이라하며, 변수 또는 자연현상이 무작위하게 나타나는 특징을 확률론을 사용하여 수학적 모형에 이용하고 있다. 개선될 수 있는 부분은 frequentist나 Bayesian 학자[8]들에 의하여는 Uncertainty라는 용어로 Fuzzy set 학자들에 의하여는 Fuzziness[7]로 불리우고 있다.

지진에 대한 구조물의 안전을 연구하는 분야는 기본적으로 세가지로 나누어진다. 그 첫번째는 구조물에 작용하는 지진입력의 산정이며, 두번째는 지진입력에 대한 구조물의 거동을 규명하는 일이며, 마지막으로 구조물이 안전하도록 설계하는

것이다. 구조물의 거동을 해석하고 설계하기 위하여는 지진입력의 산정이 우선되어야 하므로 이 글에서는 현재 연구되어진 지진입력의 예측방법을 고찰하고 각 방법에 내재된 불확실성에 대하여 언급함으로써 앞으로 연구되어야 할 분야를 제시하고자 한다.

지진예측 또는 지진위험분석이란 어느 지역에서 지진이 발생 할경우 인명과 시설에 작용할 수 있는 지반운동변수(속도, 가속도, 변위 또는 지진강도)를 평가하는 작업을 말한다.

현재 확정론적 방법(Deterministic Method)이 가장 많이 쓰이고 있으나, 그밖에도 규준의 의한 방법[1, 2, 3], 확률론적 방법[4, 5, 6], 베이지안(Bayesian) 방법[7] 등이 사용하고 있다.

규준에서는 설계변수의 최소값을 규정하는 지진 위험지도를 규정한다. 국내규준[1]의 경우, 각 지역에서 앞으로 50년 동안에 발생할 확률이 10%를 초과하는 지진에 의한 최대 지반가속도를 사용하여 전국을 지진구역 0에서 2까지의 세가지로 분류하였다. 일반적으로 규준에서는 인명과 구조물의 완전 파괴(collapse)에 대하여 규정하며, 구조적 또는 건축적 손상은 고려하지 않는다.

### 2. 확정론적 방법

확정론적인 방법에서는 경험적 자료나 해석방법에 의하여 지진입력(최대지반가속도, 응답스펙트

\* 정회원, 연세대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

라, 지진이력 등)을 산정하므로 여러 단계에서 안전률을 고려하게 된다. 이 안전률은 단순히 구조물에 필요한 안전폭뿐 아니라 여러가지 물리적 변수에 대한 불확실성등으로 인하여 점차 누적되게 된다. 확정론인 방법에서 사용하는 물리적 변수와 그 영향을 일부 나열하면 다음과 같다.

우선 지진의 성격에 대하여 보면, 우선 지진구역의 형태는 지반운동의 정도를 결정하며, 지진의 재현율(recurrence rate)은 지진의 상한치에 영향을 주며, 지진의 상한치는 지반운동의 설계값과 밀접한 관계가 있는데, 이 모든것이 지진의 역사적 기록과 지질학적 영향을 받는다. 그러나 아무리 역사적 기록이 길어도 지진의 재현주기에 비교하면 너무나 짧을 뿐 아니라 지질학적 자료나 단층에 대한 연구도 미흡한 상태이다.

지진원에 대하여 보면, 진앙의 위치로 설계지진의 위치를 결정하나 그 오차는 아무리 정확해도 1km이상이며 경우에 따라서는 50km까지도 된다. 지진의 크기도 저주파수와 지반운동에 영향을 미치지만, 관측기기의 위치와 지역의 지진속도모형에 따라 오차가 0.1에서 1이상까지 변화를 보인다. 또한 단층의 길이도 지진의 크기와 지진모멘트에 영향을 끼친다.

그밖에 거리에 따른 지진에너지의 감쇠율과 지역의 지질조건도 지반운동의 최대치나 주파수내용에 대하여 영향을 미치지만 자료의 내용이나 물리적 성질에 대하여 완전히 규명되어 있지 않다.

### 3. 확률론적 방법(시간독립모형)

지진위험 해석에 있어서 확정론적 방법이 많이 사용되고 있지만, 대부분의 지진발생 모형에서는 포아송과정(Poisson Process)이 가장 많이 사용되고 있다. 포아송과정은 시간독립모형(time-independent)으로서 지진의 발생은 과거의 지진발생 이후로 경과된 시간과 무관하다고 가정한다. 포아송과정에 의한 지진발생은 코넬[4]에 의하여 1968년에 처음 발표되었으며, 점원모형(點原, point source model)이라고도 한다. 점원모형에서는 지진발생시 에너지가 진앙에서 시작되며, 부지에서서의 지진강도는 진원에서 부터의 거리에 관한 함수로 나타

낼 수 있다고 가정하는데, 이 가정은 일부지역에서는 적용될 수 있지만, 전체에너지가 점원이 아닌 큰 지진의 발생시에는 불합리하다.

그후 키레기안과 양[5]은 지진발생시 에너지는 점원에서 발생한 후 단층을 따라서 대칭으로 파급된다는 가정하에 단층붕괴모형(Fault-Rupture Model)을 제시하였다. 이 모형에서는 부지에서서의 지진의 강도는 부지에서부터 가장 가까운 단층의 붕괴로부터의 거리에 관한 함수로 나타내어진다.

같은 포아송과정으로, 벤더[6]는 단층의 붕괴가 지진의 크기에 따라 무한대로 크게 발생하는 것이 아니라 단층내에서만 생긴다는 가정하에 1983년에 유한단층붕괴모형(Finite-Fault Rupture Model)을 발표하였다. 미국 기준에 있는 지진위험도는 벤더의 모형에 의한 엘저미슨등[10]의 지진위험도에 근거를 하고 있다.

확률론적 지진해석은 그림1과 같이 네단계의 과정을 거친다. <그림1a>는 지진원의 모형화를 나타내는 것으로서, 지진원은 활동률(activity rate), 지진의 규모-빈도의 법칙, 감소율등에 있어서 동질성을 갖도록 하여야 한다. 지진이 활발한 지역에서는 지진원이 점, 선, 면적등으로 구분되어 분류될 수 있으나, 지진발생의 원인이 규명되지 않고 지진

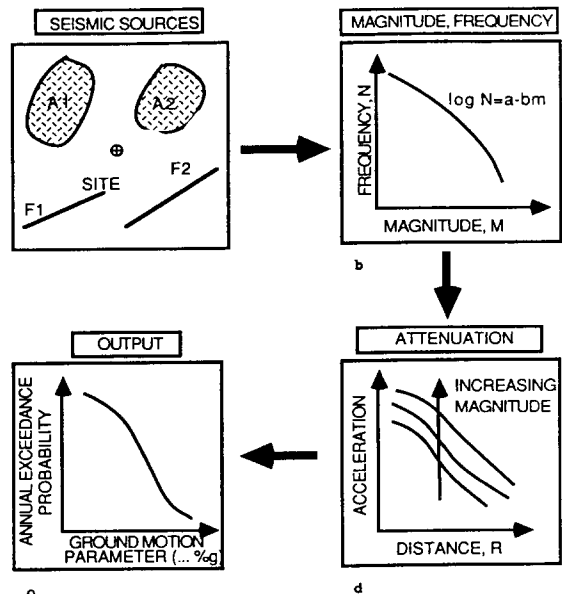


그림1. 확률론적 지진예측 방법(시간독립모형)

의 발생이 작은 지역에서는 지질구조구(地質構造區, tectonic province)에 의하여 지진모형을 만든다. 어느 지역에서의 지진입력변수는 그 지역을 포함하는 지질구조구의 역사적 최대지진의 값보다 크게 정하므로 항상 보수적인 설계를 하게된다. <그림1b>는 지진의 규모와 빈도의 관계를 보여주며, 일반적으로  $N(m) = f(m, t)$ 의 형태를 취한다. 여기서  $N(m)$ 는  $m$ 보다 큰 지진의  $t$ 기간동안 발생한 횟수이다. 가장보편적으로 사용되는 식은 리히터의 규모-빈도의 관계식으로서  $\log N(m) = a - bm$ 과 같은 선형관계식을 사용한다. 이 식은 지역적 특성을 가지고 있으며, 기울기  $b$ 의 타당한 값을 구하기 위해서는 많은 기록을 필요로 한다. <그림1c>는 지반운동 변수의 값이 지역에서의 거리가 증가하거나 지진의 크기가 작아짐에 따라 작아지는 현상을 나타내는 감쇠곡선을 보여준다. 일반적인 형태는

$$Y = f_1(M) f_2(R) f_3(M, R) f_4(P_i) \epsilon$$

로 표시되며,  $Y$ 는 지진운동변수(지진강도, 지반가

속도 등),  $f_1(M)$ 은 지진크기의 함수,  $f_2(R)$ 는 지진원에서의 거리의 함수,  $f_3(M, R)$ 은 지진크기 및 거리의 함수,  $f_4(P_i)$ 는 지진의 전달경로 및 구조물의 함수,  $\epsilon$ 은 윗식의 불확실성을 나타내는 함수이다. 감쇠곡선도 지역적 특성에 따라 50여개 이상이 발표되었으며, 특히 최대모멘트의 결정은 지진입력의 산정시 큰 영향을 미치게 된다. <그림1d>는 확률론적 모형에 의한 일반적인 지진입력의 결과를 보여준다. 지진예측의 결과치는 주어진 지반운동변수를 초과하지 않는 연간확률을 구하거나, 주어진 비초과확률에 대한 지반운동변수를 나타내는데 사용된다.

#### 4. 확률론적 방법(시간종속모형)

포아송모형이 대부분의 확률론적방법에 의한 지진위험도 작성에 사용되지만, 70년대 후반부터 시간종속(time-dependent)모형이 나타나게 되었다. 시간종속모형에서는, 지진의 크기와 과거의 지진발생이후의 경과된 시간사이에 상관관계가

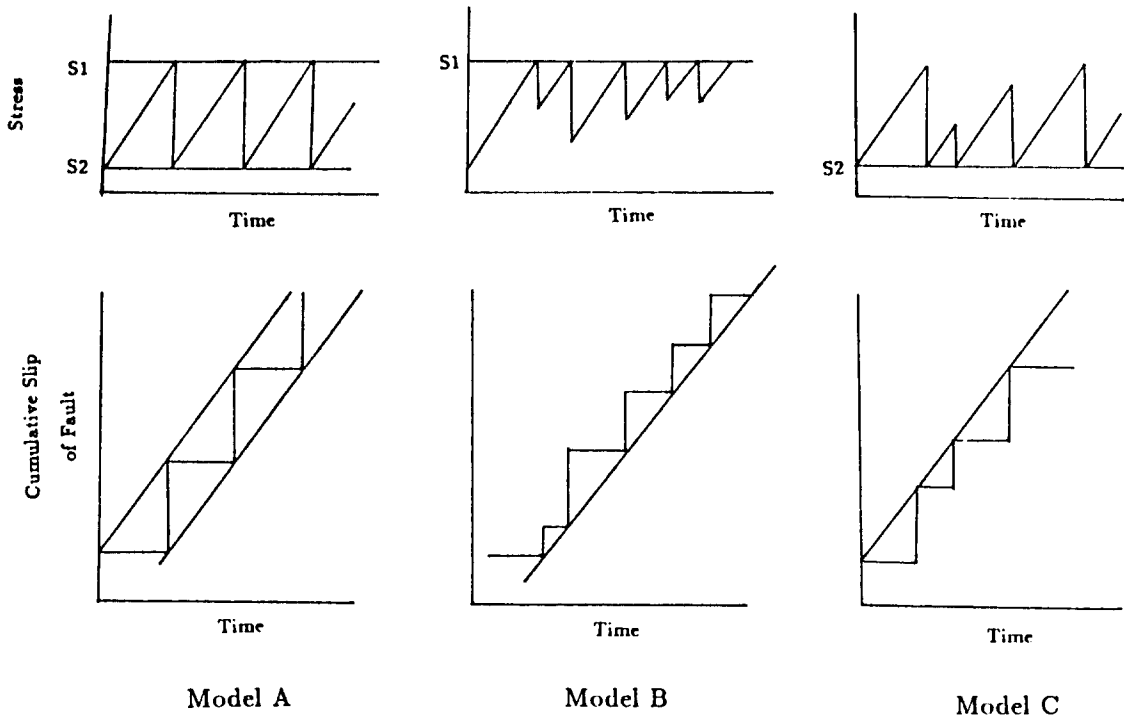


그림2. 지진재래모형(Earthquake Recurrence Model) [11]

있다는 가정에 근거한다. 시마자키와 나카다[11]는 지진재래모형(Earthquake Recurrence Model)을 진원에서의 누적에너지(응력)를 중심으로 세가지로 구분하였다(그림2). (그림2a)는 S1의 에너지가 단층에 누적되면 지진이 발생하여 S2의 에너지만이 남게 되며, 다시 시간이 경과할수록 에너지가 누적되어 S1이 되면 지진이 다시 발생하는 것을 보여준다. 지진발생사이의 에너지 누적율은 일정하며, S1과 S2의 에너지차이를 에너지 누적율로 나누면 지진의 재현기간이 된다.

그림 2b는 S1의 에너지가 누적되면 지진이 발생하는 것은 1a와 같으나, 지진발생시 방출되는 에너지의 양이 일정하지 않다. 그림2c는 지진발생시의 에너지의 크기는 모르나 지진이 발생하면, S2의 에너지만을 남겨놓고 모든에너지가 방출됨을 보여준다.

키레미지안과 아나그노스[12]는 진앙의 변형에너지에 준마르코프(semi-Markovian)모형을 적용하여 지진발생을 예측하였다. 지진의 원인으로 탄성반발설이 가장 보편적으로 인정을 받고있는 점을 고려하면, 시간독립모형보다 좀더 적합한 방법이나 현재까지의 자료로서는 합리적인 값을 구하기 어렵고 좀더 많은 지질학적 자료를 필요로 하므로 앞으로 많은 연구가 필요하다.

## 5. 베이지안방법

확률론적 방법에 필요한 입력들(지진원의 모형화, 지진규모와 발생율의 관계, 감쇠곡선등)의 결정방법에 따라, 또한 전문가의 주관적 판단에 따라 지진위험도와 다르게 나타나곤 한다. 그림3은 미국 동부의 지질구조구를 전문가에게 의뢰하여 작성한 것 중 일부이다[13]. 십여명의 지질전문가들이 설문조사에 응하였으나 각자가 다른 지질구조구를 작성하였다. 이러한 확률론적방법에 내재하는 불확실성을 감소시키고 지진전문가들의 주관적인 판단을 첨가하여 좀더 보편적으로 인정할 수 있는 지진예측수단을 발전시키려는 의도가 베이지안방법에 의하여 시도되었다[7, 13]. 로렌스 리버모어 실험실의 연구는 지진구역을 결정하고 지진재래 모형의 변수들을 산정하는데 전문가들에 의하여 결정하였다. 미국 동부지역에 대하여 지역특성을 갖는 스펙

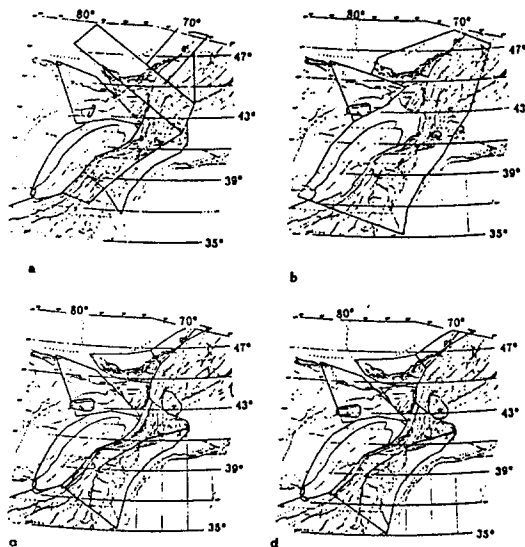


그림3. 전문가들에 의한 미국 동부의 지질구조구[13]

트라를 작성하였고, 지진계수들의 불확실성을 몬테칼로 모의발생법을 이용하여 결정하였다. EPRI에서는 여섯개의 전문가모임에 의하여 제공된 불연속인 입력자료에 로지트리 방법을 적용하여 불확실성을 개선하였다. 이 보고서는 중간보고서만이 발간되었으며, 지반운동에 대한 불확실성을 모형화하지 않고 같은 중요도를 갖은 지반운동 모형이 사용되었다. 일반적으로 베이지안방법은 확률론적 방법의 보완책으로서 부족한 자료의 보완이나 전문가간의 서로 다른 의견을 조정하는 방법등으로 사용되고 있다.

## 6. 결론

위에서 검토한 바와 같이 지진예측분야는 규준에 의한 방법이 일반 구조물에 적용하기에 무난하며, 가장 보편적으로 사용되는 방법은 확정론적 방법과 시간독립 확률론적 방법이라 하겠다. 물론 시간중속 확률론적 방법과 베이지안 방법이 연구되고 있지만, 아직은 실무에서는 사용되고 있지 않는 실정이다.

지진예측분야에서는 아직도 많은 불확실성이 내재하며, 그 불확실성은 전문가의 판단에 의하여 서로 다른 안전폭을 결정함으로써 또는 안전율을

중복되게 적용함으로써 필연적으로 서로 다른 결과를 구하게 된다. 심지어 미국 동부의 경우 전문가에 따라 지반가속도가 2배 이상 차이가 나기도 하며, 그 전문가들이 모두 그 분야에서 능력을 인정받고 있는 실정이다. 우리나라의 경우도 기록기에 의한 자료 및 지질학적 연구가 미흡하고 역사기록도 한정되어 있는 실정이나, 원자력 발전소의 위험성과 파급효과를 고려할 때 우리나라 특성에 맞는 지진예측 방법이 좀더 연구되어야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

1. 건설부, 내진설계 지침서 작성에 관한 연구, 1987 . 12
2. ATC-3-06, *Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings*, Applied Technology Council, Palo Alto, CA 1978.
3. ICBO. *Uniform Building Code* 1988
4. Cornell, C.A., Engineering Seismic Risk Analysis, Bull. Seismic. Soc. Am. Vol. 58, No. 5, Oct. 1968, pp. 1583-1606.
5. Der Kiureghian, A. and Ang, A. H-S., A Fault-Rupture Model for Seismic Risk Analysis, Bull. Seismic. Soc. Am. Vol. 67, No.4, Aug. 1977, pp. 1173-1194.
6. Bender, B., Seismic Hazard Estimation Using a Finite-Fault Rupture Model, Bull. Seismic. Soc. Am. Vol. 74, No.5., Oct. 1983, pp. 1899-1923.
7. Electric Power Research Institute. Seismic Hazard Methodology for Nuclear Facilities in the Eastern United States, EPRI Research Project Number P101-29(Draft), 1985.
8. Hong, K., Frangopol, D. M. and Ikejima, K., Seismic Hazard Prediction Using a Probabilistic-Fuzzy Approach, Structural Safety, Vol.5, 1988, pp. 109-117.
9. Hong, K. and Frangopol, D.M., A Probabilistic-Fuzzy Model for Seismic Hazard Applied to the Wasatch Front Range in Utah, Proc. 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, May 20-24, 1990, Palm Springs, CA, pp. 732-742.
10. Algermissen, S.T., Perkins, D.M., Thenhaus, P.C., Hansen, S.L., and Bender, B.L., Probabilistic Estimates of Maximum Acceleration and Velocity in Rock in the Contiguous United States, U.S. Geol. Surv., Open File Report, No. 82-1033, 1982.
11. Shimajaki, K., and Nakada, T., Time Predictable Recurrence for Large Earthquakes, Geophysics. Res. Letters, Vol. 7, 1980, pp. 279-282.
12. Kiremidjian, A.S. and Anagnos, T., Stochastic Slip-Predictable Model for Earthquake Occurrences, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 74, 1984, pp. 739-755
13. Lawrence Livermore National Lab., Seismic Hazard Analysis, Vol. 1-5, NUREG/CR-1582, 1981.