

# 한반도 지진목록자료의 불완전성을 고려한 지진재해도 분석

## Seismic Hazard Analysis

### Considering the Incompleteness in the Korean Earthquake Catalog

연관희\*, 이종림\*\*, 함영승\*\*\*  
Yun, Kwan-Hee Lee, Jong-Rim Ham, Young-Seung

#### ABSTRACT

In this paper, two methods, Stepp's and EQHAZARD, are introduced and applied to a recent earthquake catalog for the entire Korean Peninsula that can estimate the seismicity by incorporating the incompleteness of the earthquake catalog. EQHAZARD method, different from Stepp's method in that it uses priori information besides the assumption of stationary Poisson process of the earthquakes, produces the higher seismicity rate for the smaller earthquakes. EQHAZARD method are also used to estimate the incompleteness of the recent earthquake catalog for the southern part of the Korean Peninsula in terms of the Probability of Activity for the specified earthquake magnitude classes and time periods. It is believed that the Probability of Activity thus obtained can be used as a strong priori information in estimating the seismicity for a seismic source within the region where there are not enough earthquakes detected. Finally, it is demonstrated that the arbitrary selection of the methods of incompleteness analysis brings quite different seismic hazard results, which suggests the need to employ a rigid quantitative method for incompleteness analysis in estimating the seismicity parameters in order to reduce the uncertainty in the Seismic Hazard Results with the EQHAZARD method being one of the competent practical alternatives.

#### 1. 서론

원자력 발전소의 지진에 대한 안전성을 공학적으로 평가하기 위한 방법으로는 확률론적 지진 재해도 분석이 있다. 지반운동가속도별 연평균초과누적발생확률로서 표시되는 확률론적 지진재해도 분석 (Probability Seismic Hazard Analysis, PSHA)의 결과는 원전 안전 관련 기기의 확률론적 안전성 평가(Probability Safety Assessment, PSA)의 입력자료나 원전 설계기준으로 사용되는 안전정지 지진 (Safety Shut-down Earthquake, SSE)에 대한 확률론적 평가에 활용된다. PSHA를 수행하기 위해서는 지진의 발생 특성을 수학적 모델로서 정의하여야 하며 주요 구성 모델인 연평균지진발생율(이하 지진발생율) 및 지진규모-빈도 관계식은 지진목록 (Earthquake Catalog) 자료의 불완전성을 고려하여 추정된다. 기존의 PSHA 수행시에는 지진목록에 대한 정량적인 평가 없이 지진목록을 여러 구간으로 나눈 후 각 구간이 완전하다고 가정하여 지진활동 파라미터를 추정한 결과 비계약적인 리히터 b값으로 인해 지진재해도의 불확실성을 증가시켰다. 본 연구에서는 1905~1998년 동안의 한반도 지진목록에 대한 불완전성을 정량적으로 고려할 수 있는 방법을 알아보았으며, 불완전성을 고려함에 따른 지진재해도 결과의 영향을 알아보았다. 지진재해도 계산 시에는 미국 중·동부 지역의 PSHA를 위해 미국전력연구소 (Electric Power Research Institute, EPRI)에 의해 개발된 산프로그래밍인 EQHAZARD를 이용하였다.

\* 한국전력공사 전력연구원 일반연구원, 정희원

\*\* 한국전력공사 전력연구원 수석연구원, 정희원

\*\*\* 한국전력공사 부장, 정희원

## 2. 본문

지진목록의 불완전성이란 지진목록 자료로 규정되는 시기 및 대상지역 내에 발생한 모든 지진이 지진목록에 기록되지 않은 특성으로 정의된다. 불완전성은 소규모의 지진 및 설치된 지진관측망 및 인구밀도가 희박한 지진목록의 초기 시간대 및 지역에 대한 지진활동 파라미터 추정시 심각한 문제가 된다. 지진목록을 이용한 지진활동 파라미터 추정시 불완전성을 고려할 수 있는 일반적인 방법은 다음과 같다.

(가) 특정한 최소규모이상의 지진만을 고려하여 지진활동 파라미터 추정

(나) 각 지진규모별로 서로 다른 완전한 시기를 추정하고 이를 지진활동 파라미터 추정에 이용

(다) 지진목록 지진의 위치, 규모 및 시기에 따른 불완전성에 대한 선험정보 (Priori Information, 先驗情報)를 가정한 후 지진활동 파라미터 추정

(가) 방법은 가장 쉽게 활용할 수 있는 방법이나 최소 규모의 설정이 임의적이고 불완전성의 정량적인 고려가 어렵고 지진활동성이 적은 지역에서는 주어진 지진자료를 최대한 활용할 수 없는 단점이 있다. (나) 방법은 Stepp이 고안한 방법으로서(Carl Stepp, 1972) 지진목록의 정상성(Stationary)을 평가하여 불완전성을 고려할 수 있으나 지진원의 영역이 적은 수의 지진기록을 포함한 경우에는 적용이 힘든 방법이다. (다) 방법은 EPRI에서 개발한 방법(EPRI, 1989)으로 지진발생이 적은 지역에서 지진목록 자료 이외의 선험정보 까지도 최대한 활용할 수 있는 방법이다.

### 2.1 이론

#### 2.1.1 Stepp 방법

이 방법은 지진발생이 포아송분포를 따른다는 가정 하에 연평균지진발생율( $\lambda$ )의 분산( $\sigma_\lambda$ )이 식 (1)과 같이  $1/\sqrt{T}$ 에 비례하는 특성을 이용하여 지진규모별로 완전한 표본시간간격을 추정하는 방법이다.

$$\sigma_\lambda = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{T}} \quad \text{식 (1)}$$

여기서 T는 지진목록의 시간표본 길이이다. 위 식으로부터 표본이 완전하고 정상성을 가정한다면,  $\sigma_\lambda$ 는  $1/\sqrt{T}$ 에 비례하며 그 값은 지진규모 등급에 대해서는 일정하여야 한다. 지진규모별로 정상성을 갖는 안정된 지진발생율을 계산하기 위해서는 지진목록 내의 지진은 규모등급에 따라 분류되고 표본시간간격에 따른 초과누적지진발생율의 분산을 계산하여  $1/\sqrt{T}$  경향을 갖는 표본시간간격을 결정하면 된다.

#### 2.1.2 EQHAZARD 불완전성 평가 방법

EQHAZARD 방법에서는 지진활동 파라미터에 영향을 미치는 지진목록의 불완전성을 수학적 모델인 지진탐지확률(Probability of Earthquake Detection)을 이용하여 정량적으로 분석한다. 지진탐지확률은 지진발생위치( $x$ ), 지진발생시기( $t$ ), 지진규모( $m$ )의 함수로서 불완전성의 정량적 평가를 위해 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\lambda(x, m) = P_D(R(x), t, m) \lambda(x, m) \quad \text{식 (2)}$$

여기서  $R(x)$ 는 불완전성이 일정한 지리적 영역이며  $\lambda(x, m)$ 는 지진목록 자료에 기반하여 추정된 규모-빈도 관계식이며  $\lambda(x, m)$ 은 실제 지진 발생회수에 기반한 규모-빈도 관계식으로 식 (3)으로 주어진다. 식 (2)에서  $P_D=1$ 은  $\lambda(x, m) = \lambda(x, m)$ 로서 지진목록에 지진이 완벽하게 기록됐음을 의미하며 반면  $P_D=0$ 은 전혀 기록되지 않았음을 의미한다.

$$\lambda(x, m) = \begin{cases} \exp\{a(x) - b(x)(m - m_0)\}, & m_0 \leq m \leq m_{\max} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{식 (3)}$$

지진발생의 포아송 가정 하에 공간, 시간, 지진규모에 대한 지진발생은 서로 독립이며 지진목록에 기록된 지진발생회수가  $n(x, t, m)$ 일 확률은 지진발생회수의 기대값인  $\bar{n}(x, t, m)$ 을 파라미터로 하는 다음과 같은 확률 분포를 따른다. (EPRI, 1989)

$$f(n(x, t, m)) = \frac{\{\bar{n}(x, t, m)\}^{\bar{n}(x, t, m)}}{n(x, t, m)!} \exp\{-\bar{n}(x, t, m)\} \quad \text{식 (4)}$$

여기서,  $\bar{n}(x, t, m) = T(R(x), t, m)\lambda(x, t, m)$ 이며  $T(R(x), t, m)$ 은 기록구간이다. 한편 지진발생의 포아송 가정에 의해 총 지진발생회수의 최우도추정값 (最尤度 推定, Maximum Likelihood Estimate)  $L$ 은 식 (5)으로 표시된다.

$$L \propto \prod_{x, t, m} f(n(x, t, m)) \quad \text{식 (5)}$$

식 (5)의 양변에 로그값을 취하고 식 (3)를 적용하면 다음과 같은 최우도함수를 얻을 수 있다.

$$\ln\{L\} \propto \sum_C n(C) \ln T(C) + \sum_C n(C) \ln P_D(D) + \sum_X n(x) a(x) - \sum_x m(x) b(x) - \sum_C T(C) P_D(D) \exp\{a(x) - b(x)m\} \quad \text{식 (6)}$$

여기서,  $C = \text{volume with indexes } (x, t, m)$ ,  $D = \text{space with indexes } (m, t)$ 이며

$$n(C) = T(C) P_D(D) \exp\{a(x) - b(x)m\}, n(x) = \sum_m \sum_t n(x, t, m), m(x) = \sum_m \sum_t m \cdot n(x, t, m) \text{이다.}$$

식 (6)로부터 최우도함수를 최대로 하는  $a(x)$ ,  $b(x)$  및  $P_D(D)$ 를 계산하기 위해서는, 우선  $a(x)$ ,  $b(x)$ 에 대해 편미분하여 얻어진 최우도방정식을 통해  $a(x)$ ,  $b(x)$ 를 계산한 후  $P_D(D)$ 에 대해 편미분하여 얻어진 최우도방정식을 통해  $P_D(D)$ 를 계산하는 일련의 과정을 주어진 허용오차를 만족할 때까지 반복하여 얻어진다.

EQHAZARD 방법에 의해  $P_D$ 를 계산하기 위해서는  $P_D$ 에 대해 초기값 가정을 하여야 하며 다음과 같은 제약조건이 주어진다.

(가)  $P_D$ 는 규모, 시기에 대해 단조증가 함수이다.

(나)  $P_D$ 는 각 규모 및 시기별로 평활화 상수에 의해 제약받는다.

(다)  $0 \leq P_D \leq 1$

지진발생지역 및 규모에 대한 등가완전기간(equivalent period of completeness)  $T_E(x, m)$ 은 불완전성 분석의 결과로서 다음과 같다.

$$T_E(x, m) = \int_{T_0}^{T_1} P_D(R(x), t, m) dt \quad \text{식 (7)}$$

여기서  $[T_0, T_1]$ 는 실제 지진발생율을 추정하기 위한 지진기록 구간이다. 그리고 불완전성이 정량적으로 고려된 실제 지진발생율  $\lambda$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\lambda(x, m) = \frac{N(x, m)}{T_E(x, m)} \quad \text{식 (8)}$$

여기서  $N(x, m)$ 는 지진목록 내의 지역  $x$ 에서 발생한 규모  $m$  지진의 발생횟수를 의미한다.

## 2.2 지진목록의 불완전성 평가 방법에 따른 지진규모-빈도 관계식 비교

현재까지 만들어진 국내의 지진목록 중 공인도가 가장 높은 지진목록을 사용하기 위해 국내의 내진설계기준 설정을 위한 지진재해도 계산에 이용된 지진목록(1997, 건설교통부)를 사용하였으며 1996에서 1998년까지의 자료는 기상청의 자료를 이용하였다. 1905년 이후의 지진목록에 대한 지진 발생률의 변화는 그림 1에 나타나 있다.

지진규모마다 서로 다른 완전성 시간간격을 추정하여 계산한(Stepp 방법) 초과누적지진발생률과 시기 1918-1998의 전구간을 완전하다고 가정하여 계산된 초과누적지진발생률을 도표 1에 비교하였다. 도표 1에 나타난 바와 같이 소규모 지진에 대한 지진발생률은 불완전성을 고려하지 않은 경우보다 과소 평가된 반면, 중·대규모 지진에 대해서는 미소하나마 과대평가되었다. 그림 2는 Stepp 방법에 의한 완전성 시기 평가시 얻어진 초과누적지진발생률의 분산곡선이다.

도표 1의 자료를 회귀분석하여 얻어진 Gutenberg-Richter 관계식은 그림 3과 같다. 한편 Stepp 방법에 의해 2.7이상의 초과누적지진발생률을 계산한 결과 9.11/yr로서 Gutenberg-Richter 관계식에 의한 예측값인 11.8/yr 보다는 낮게 평가되었으나 불완전성이 전혀 고려되지 않은 경우의 예측값인 7.762/yr 보다는 높게 나타났다.

EQHAZARD 방법에 따라 식 (2)에서 정의된 지진목록의 불완전성 정량치인 지진탐지확률을 계산하기 위해서는 지리적 영역인  $R(x)$ 와 지진발생시기  $t$ 가 결정되어야 한다. 일반적으로  $R(x)$ 는 인구분포 및 지진계의 설치 위치 등에 의해 결정된다. 본 연구에 적용된  $R(x)$ 는 한반도 전역에 대한 경도 122°, 134°, 위도 33°, 45°를 경계로 한 직사각형으로 설정하였다. 지진발생시기는 도표 1과 같이 지진목록 내의 1905년 이후의 연대를 지진관측망과 관련된 중요한 사건을 기준으로 하여 1905~1943, 1963~1977, 1978~1998의 시기로 구분하였다. (한국전력공사, 1998) 지진탐지확률에 대한 선형정보로는 시기에 관계없이 규모 6.3이상의 지진, 그리고 1978년 이후에 대해서는 규모 4.5이상의 지진에 대해 완전하다는 가정을 하였다.

도표 2에는 EQHAZARD를 이용하여 얻어진 지진목록 내의 모든 지진에 대한 지진탐지확률이 지진의 규모 및 시기별로 기재되어 있으며, 도표 3은 식 (7), (8)에 따라 불완전성을 고려하여 산출한 초과누적지진발생률이 있다. 그림 4에는 Stepp 방법 및 EQHAZARD 방법에 의한 지진규모-빈도 관계식을 비교하였다. EQHAZARD 방법에 의한 불완전성 분석은 작은 규모의 지진발생률에 큰 영향을 끼쳤으며 리히터 b값은 0.86으로 계산하였다.

## 2.3 지진재해도 결과 비교

지진목록의 불완전성 고려에 따른 지진재해도의 영향을 고찰하기 위해 경도 126°, 130°, 위도 34°, 38°를 경계로 하는 가상의 지진원으로 가정한 후 EQHAZARD를 이용하여 지진목록의 불완전성과 지진활동 파라미터를 동시에 추정하였으며 이 결과를 바탕으로 지진원 중심 위치에서의 지진재해도를 계산하였다. 불완전성영역( $R(x)$ )으로는 한반도 남부지역인 경도 126°, 130°, 위도 34°, 39°의 직사각형을 이용하였다. 도표 4는 이때 계산된 지진탐지확률로서 식 (7), (8)를 이용하여 한반도 남부지역의 임의의 지진원에 대한 지진활동 파라미터 계산에 활용될 수 있다.

지진재해도는 PGA에 대해 계산되었으며 사용된 지반운동감쇠식은 다음과 같다. (신진수, 1998)

$$\ln a = 0.40 + 1.2M - 0.76 \ln R - 0.0094R \quad \text{식 (9)}$$

여기서  $a$ 는 가속도 ( $\text{cm/sec}^2$ )이며  $M$ 은 리히터 규모,  $R$ 은 거리 (km)이다. 최대 지진은 규모 7.2, 최소 규모 5.0으로 가정하였으며 지반운동감쇠식의 대수표준편차는 0.6으로 하였으며 진앙에 대한 제한 거리는 적용하지 않았다.

그림 4의 지진재해도 곡선은 EQHAZARD 프로그램을 이용한 결과로서, EQHAZARD 불완전성 평가 방법에 따른 지진재해도 곡선과 최소 지진규모의 설정에 따른 지진재해도를 비교하는 그림

이다. 이 그림으로부터 임의로 설정된 최소지진에 따라 지진재해도의 결과가 많은 차이를 나타냈었다.

### 3. 결론

본 연구에서는 지진목록의 불완전성을 고려하여 지진활동성을 평가할 수 있는 일반적인 방법에 대해 고찰하고 신뢰도 있는 국내지진목록 자료에 이 방법들을 적용하여 그 결과를 비교하여 보았다. 비교 결과 EQHAZARD의 불완전성 평가 방법이 지진목록자료 외에도 불완전성에 대한 선형정보를 추가적으로 계산에 반영함으로써 합리적인 리히터 b값을 도출하였다. 또한 EQHAZARD를 이용하여 한반도 남부지역의 1905~1998년 동안의 지진목록에 대해 지진활동성을 평가하고 불완전성의 정량치인 지진탐지확률을 제시하였다. 특히 도출된 지진탐지확률은 지진활동성이 비교적 적은 한반도 남부의 지진원에 대한 지진활동성 평가시 유용한 선형정보로 활용될 것으로 기대된다. 또한 불완전성 평가 종류에 따라 지진재해도 결과가 많은 차이를 보였으며 정량적인 불완전성 평가 방법에 의해 지진재해도 불확실성이 저감될 수 있는 가능성 제시하였다.

### 4. 참고문헌

1. 건설교통부, 한국지진공학회, 한국건설기술연구원 (1997), "내진설계기준연구(II) (내진설계성능기준과 경제성평가)".
2. 신진수, 이종립, 박창업 (1998), "한반도 남부의 지진감쇠특성", 1998년 한국지진공학회 춘계 학술발표 논문집, 44-51.
3. 연관희, 이종립 (1998), "EQHAZARD를 이용한 한반도 지진 파라미터 추정", 1998년 한국지진공학회 춘계 학술발표 논문집, 31-38.
4. 한국전력공사 (1998), "양산단층을 고려한 설계기준지진의 재평가 (제2권)"
5. Electric Power Research Institute (1989), "EQHAZARD Primer".
6. Electric Power Research Institute (1989), "Seismic Hazard Methodology for the Central and Eastern United States, Volume 1 (Theory), Part 1".
7. Electric Power Research Institute (1989), "Seismic Hazard Methodology for the Central and Eastern United States, Volume 2, Revision 1".
8. J.C. Stepp (1972), "Analysis of Completeness of the Earthquake Sample in the Puget Sound Area and Its Effect on Statistical Estimates of Earthquake Hazard.", Proceedings, International Conference on Microzonation, vol. 2, pp. 897-910.

도표 1. 불완전성 평가 방법에 따른 지진규모별 초과누적지진발생율

규모	지진규모별 동일 완전시기 적용		지진규모별로 서로 다른 완전시기 적용	
	초과누적지진발생율	완전시기(년)	초과누적지진발생율	완전시기(년)
3.3 ~ 3.9	3.15	80	4.5125	40
3.9 ~ 4.5	1.425	80	1.458	40
4.5 ~ 5.1	0.725	80	0.578	80
5.1 ~ 5.7	0.1625	80	0.1445	90
5.7 ~ 6.3	0.0875	80	0.0845	90
6.3 ~ 6.9	0.05	80	0.0245	100
6.9 ~ 7.5	0.0	80	0.0	N.A.

도표 2. 1905년 이후의 한반도 전역에 대한 지진탐지확률

Magnitude	Time Period (AD)		
	1905-1943	1963 - 1977	1978 - 1998
3.3 - 3.9	0.03	0.32	0.38
3.9 - 4.5	0.17	0.39	0.39
4.5 - 5.1	0.53	1.00	
5.1 - 5.7	0.53	1.00	
5.7 - 6.3	0.68	1.00	
6.3 - 6.9			

지진카타로그 지진이 완전한 시기-규모

선협정보 (완전한 시기-규모)

도표 3. EQHAZARD 방법에 의한 지진규모별 초과누적지진발생율

규모	총지진개수	$T_E$	지진발생율	초과누적지진발생율
3.3 - 3.9	128	13.22	9.68	13.25
3.9 - 4.5	51	19.72	2.59	3.56
4.5 - 5.1	42	54.14	0.78	0.98
5.1 - 5.7	6	54.14	0.11	0.20
5.7 - 6.3	6	59.84	0.05	0.09
6.3 - 6.9	6	72	0.04	0.04

도표 4. 1905년 이후의 한반도 남부지역에 대한 지진탐지확률

Magniutde	Time Period (AD)		
	1905-1943	1963 - 1977	1978 - 1998
3.3 - 3.9	0.04	0.11	0.16
3.9 - 4.5	0.22	0.22	0.36
4.5 - 5.1	0.46	1.00	
5.1 - 5.7	0.46	1.00	
5.7 - 6.3	1.00	1.00	
6.3 - 6.9			

지진카타로그 지진이 완전한 시기 - 규모

선협정보 (완전한 시기-규모)

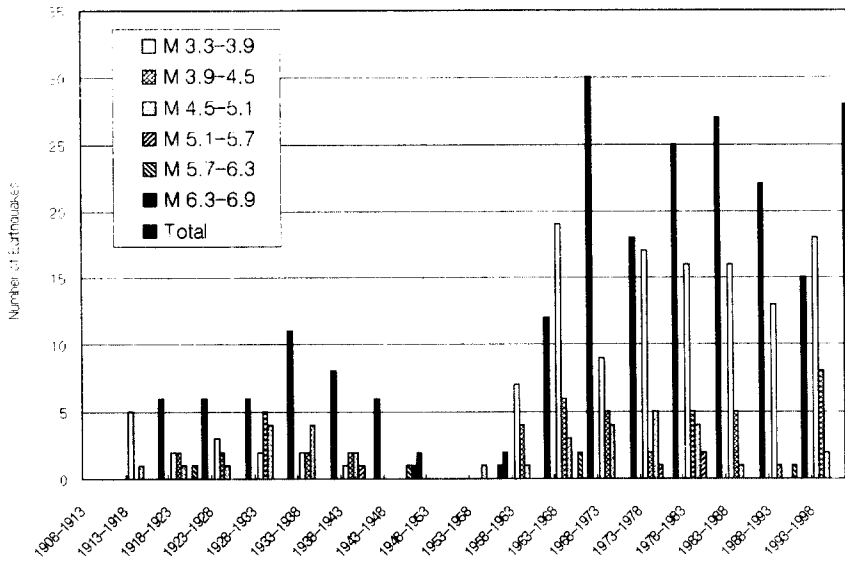


그림 1. 사용된 지진목록의 1905~1998년 시기에 대한 지진발생율

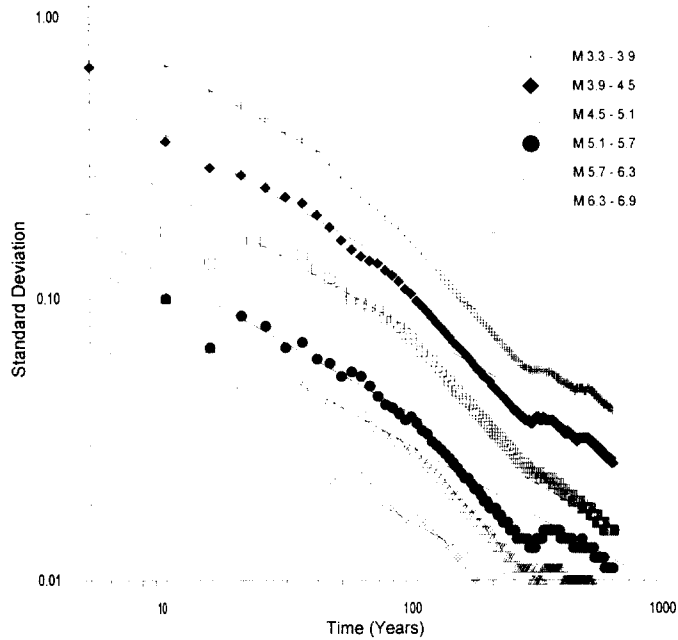


그림 2. 지진카타로그 지진의 규모등급 및 표본시간길이에 따른 초과누적지진발생율의 분산곡선

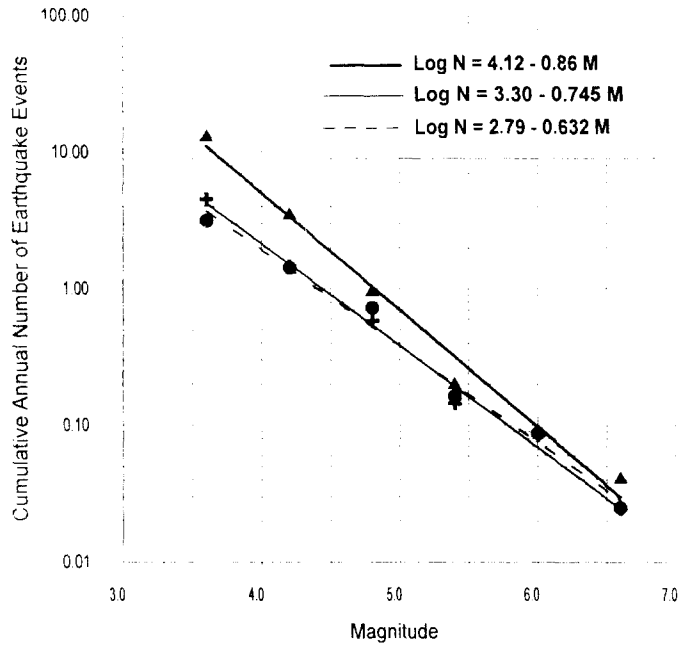


그림 3. 불완전성 평가 방법에 따른 Gutenberg-Richter 지진규모-빈도 관계식 비교

- : 1918~1998년의 완전한 시기 가정에 따른 초과누적지진발생율
- + : Stepp 방법에 따른 초과누적지진발생율
- ▲ : EQHAZARD 방법에 따른 초과누적지진발생율
- Dashed : ● 자료에 대한 최소자승 회귀분석식
- Solid : + 자료에 대한 최소자승 회귀분석식
- Thick Solid : ▲ 자료에 대한 최소자승 회귀분석식

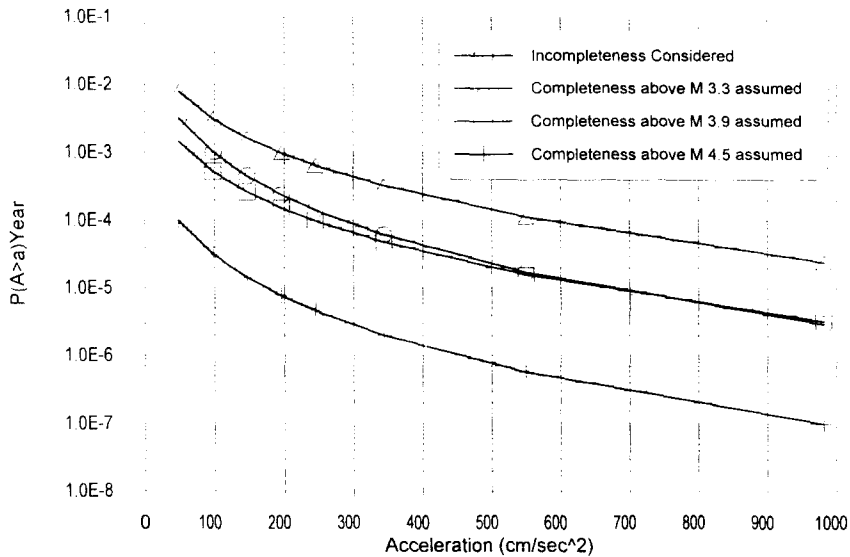


그림 4. 지진목록의 불완전성 고려에 따른 지진재해도 분석 결과