

EQHAZARD를 이용한 한반도 지진 파라미터 추정 An Evaluation of Seismicity Parameters in the Korean Peninsula Using EQHAZARD

연관희*, 이종림**
Yun, Kwan-Hee Lee, Jong-Rim

ABSTRACT

In this study, statistical analyses implemented in the EPRI EQHAZARD programs were employed to estimate the seismicity parameters in the Korean peninsula based upon an combined Korean earthquake catalog. The combined earthquake catalog was prepared by performing earthquake clustering analysis on the collected earthquake catalogs provided by experts of the seismic panel during the PSA for Yonggwang Units 1 & 2. The duplicate earthquake events and secondary events in earthquake clusters have been successfully screened. The resultant earthquake catalog was analyzed to quantitatively assess the incompleteness of the earthquake catalog for specified earthquake magnitudes and time periods. The result shows that the earthquake catalog of the Korean peninsula is complete for the times periods of 1392 ~ 1750 and 1905 ~ 1989 (AD) and earthquake magnitude above 4.5. The PSHA methodology of EQHAZARD features the estimation of inhomogeneous a - and b -values within a seismic source. This study shows various results of a - and b -values corresponding to a specified smoothing coefficient. The estimated b -value is well constrained lying between 0.6 and 1.0. Also the confidence of estimated a - and b -value for a specified location was assessed by quantifying the uncertainty of these parameters using bootstrap simulation.

1. 서론

원자력 발전소의 지진에 대한 안정성을 공학적으로 평가하기 위한 방법으로는 확률론적 지진 재해도 분석이 있다. 지반운동가속도별 연평균발생확률로서 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 안전정지지진(Safety Shut-down Earthquake: SSE)에 대한 확률론적 평가에 활용된다. PSHA를 수행하기 위해서는 지진의 발생 특성을 수학적 모델로서 정의하여야 하며 주요 모델 파라미터로는 지진원의 지리적 형상, 연평균지진발생율, 지진규모-빈도관계식, 최대지진, 지진원 활성화도(Probability of Activity) 등이 있다. 위 요소 중 연평균지진발생율 및 지진규모-빈도 관계식은 지진카타로그(Earthquake Catalog) 자료를 통계적으로 처리하여 추정되며, 통계적 처리방법으로는 지진의 군집성 분석(Earthquake Clustering Analysis), 지진카타로그의 비완전성(Incompleteness) 분석, 지진파라미터(Seismicity Parameters) 추정 및 불확실성 평가 등이 있다. 본 연구에서는 중·동부 지역의 PSHA를 위해 미국전력연구소(Electric Power Research Institute: EPRI)에 의해 개발된 전산프로그램인 EQHAZARD를 이용하여 한반도 지진카타로그에 대한 상기 통계적 처리를 수행하였다.

* 한국전력공사 전력연구원 일반연구원, 정희원

** 한국전력공사 전력연구원 수석연구원, 정희원

2. 본문

2.1 이론

지진원의 지리적 형상이 결정되면 지진원 내부에서 발생하는 지진의 시간적인 특성인 연평균 지진발생을 및 지진규모-빈도 관계식은 지진카다로그를 통계분석하여 추정된다. 일반적으로 지진 발생은 시간적으로 포아송 분포로 가정되는데, 공학적인 측면에서 지진카다로그의 포아송 분포 가정은 수식적으로 단순한 형태이며 지진발생율이 활발한 지역의 단층에 적용되는 비포아송 분포인 Time-Predictable 모델이나 Slip-Predictable 모델에 비해 충분히 보수적으로 알려져 있다 (1986, EPRI). 대표적인 지진규모-빈도 관계식은 지수함수형태의 Gutenberg-Richter 관계식이 있으며 지진 파라미터로 알려진 a_g , b 에 의해 결정된다.

$$N(m) = 10^{a_g - b \cdot m} \quad \text{식 (1)}$$

여기서 $N(m)$ 은 지진규모 m 이상의 크기를 갖는 지진의 연간 발생회수이다.

한편 EQHAZARD PSHA 방법은 동일 지진원 영역 내에서 공간적으로 불균질한 규모-빈도 관계식을 얻기 위해 다음과 같은 수학적 모델을 이용한다.

$$\lambda(x, m) = 10^{a(x) - b(x) \cdot (m - m_0)} \quad \text{식 (2)}$$

여기서 m_0 은 지진의 최소규모이며 $\lambda(m)dm$ 은 규모 m 과 $m + dm$ 를 갖는 지진의 연간 발생회수이다. $a(x)$, $b(x)$ 는 임의의 격자로 정의되는 위치벡터 x 에서의 지진파라미터로서 $b(x)$ 는 Gutenberg-Richter 관계식의 b 와 동일한 물리적 의미를 갖는다. $10^{a(x)}$ 는 $m = m_0$ 일 때의 지진 연간 발생회수로 해석된다. 규모-빈도 관계식 (2)의 $a(x)$, $b(x)$ 를 추정하기 위해서는 지진카다로그 자료에 대한 군집성(Earthquake Clustering Analysis) 분석 및 불완전성(Incompleteness) 분석이 선행되어야 한다.

일반적으로 지진은 최대 지진인 주요사건(Main Event)을 전후하여 발생하는 2차사건(Secondary Event)을 포함한 군집성을 갖는다. 지진의 군집성(Cluster)이란 공간적으로는 주요 지진의 인근 지역, 시간적으로는 단기간 내에 발생하는 지진들의 집중정도를 의미한다. 구조물에 대한 피해는 포아송 분포를 따르는 주요사건에 대해 평가되므로 군집내의 2차사건은 지진재해도 평가시 제거되어야 한다.

불완전성이란 지진카다로그 자료로 규정되는 시기 및 대상지역에 내에 발생한 모든 지진이 지진카다로그에 기록되지 않은 특성으로 정의된다. 불완전성은 적은 규모의 지진 및 지진카다로그의 초기 시간대 그리고 인구밀도가 희박한 지역에 대한 지진파라미터 추정시 심각한 문제가 된다. EQHAZARD PSHA 방법에서는 지진파라미터에 영향을 미치는 지진카다로그의 불완전성을 수학적 모델인 지진탐지확률(Probability of Earthquake Detection)을 이용하여 정량적으로 분석하였다. 정의에 의해 불완전정성은 지리적 위치, 발생시기, 지진규모와 관련된 함수로서 다음과 같이 표시된다.

$$P_D = P_D(R(x), t, m) \quad \text{식 (3)}$$

여기서 $R(x)$ 는 불완전성이 일정한 지리적 위치이며, t 는 발생시기, m 은 규모이다. 이제 지진탐

지확률은 불완정성의 정량적인 수학적 함수로서 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\hat{\lambda}(x, m) = P_D(R(x), t, m) \lambda(x, m) \quad \text{식 (4)}$$

여기서 $\hat{\lambda}(x, m)$ 는 지진카타로그 자료에 기반하여 추정된 규모-빈도 관계식이며 $\lambda(x, m)$ 은 실제 지진 발생회수에 기반한 규모-빈도 관계식이다. 식 (4)에서 $P_D=1$ 은 $\hat{\lambda}(x, m) = \lambda(x, m)$ 로서 위치 x , 시기 t , 규모 m 의 지진이 완벽하게 기록됐음을 의미하며 반면 $P_D=0$ 는 전혀 기록되지 않았음을 의미한다. EQHAZARD PSHA 방법론에서는 지진탐지확률 P_D 와 규모-빈도 관계식 파라미터인 $a(x)$, $b(x)$ 가 주요사건 지진발생회수에 대한 확률을 최대로 하는 값으로서 동시에 추정된다.

EQHAZARD PSHA 방법론에서는 지진파라미터인 $a(x)$, $b(x)$ 의 불확실성을 평가하기 위해 부트랩 시뮬레이션 (Bootstrap Simulation) 방법을 이용하였다. 부트랩 시뮬레이션은 관측 자료로부터 인공적인 통계분포를 발생하는 시뮬레이션 방법으로 관측 자료를 무작위 반복하여 인공적인 분포를 만들고 이 분포를 다시 무작위 추출하여 새로운 추출 자료를 만들어 내는 방법으로서 임의의 추정량에 대한 불확실성은 모집단분포의 복잡성과는 무관하게 불확실성을 정량화 할 수 있는 장점이 있다.

2.2 지진카타로그

PSHA의 입력자료인 지진파라미터를 추정하기 위해서는 지진카타로그를 통계적으로 처리하여야 한다. 한반도의 지진카타로그는 AD 27 ~ 1905년 이전까지의 역사지진 자료와 이후의 계기지진 자료로 구성되며 여러 지진학자들에 의해 제시되었다. 본 연구에서는 통일된 지진카타로그를 얻기 위해 다음과 같은 절차를 수행하였다.

(가) 지진카타로그의 수집

1992년 영광 1, 2호기 및 고리 3, 4 원전 부지에 대한 PSHA 수행시 입수된 지진전문가 별 지진카타로그와 현재 전력연구원과 한국원자력연구소 공동으로 추진되는 과제에서 확보된 지진카타로그를 수집하였다.

(나) 진도-규모 변환

Gutenberg-Richter (1956)에 의해 제시된 다음과 같은 변환식을 사용하여 역사지진의 진도를 규모로 변환하였다.

$$M_L = \frac{2}{3} I_e + 1.0 \quad \text{식 (5)}$$

위 식에서 M_L 은 local magnitude이며 I_e 는 진앙 MM 진도이다.

(다) 지진 군집성 분석

수집된 지진카타로그 자료는 중복된 지진 및 임의의 군집내의 2차사건 (Foreshocks, After-Shocks or Swarms)을 포함하므로 군집내의 최대 지진인 주요 지진만을 분리하여 지진파라미터를 추정하기 위해 EQHAZARD을 이용하여 군집성 분석을 수행하였다.

(라) 통일된 지진카다로그 작성 (Combined Earthquake Catalog)

수집된 지진카다로그 내의 모든 지진을 주요사건과 이차사건으로 분류하고 EQHAZARD를 이용한 지진카다로그의 불완전성 평가 및 지진 파라미터를 추정하기 위한 입력자료 형태로 지진카다로그를 재 작성하였다.

2.3 지진 군집성 분석 (Earthquake Clustering Analysis)

지진군집의 형태 및 크기와 군집영역내의 2차사건 및 중복지진을 제거하기 위해 다음과 같은 분석을 수행하였다.

(가) 공간-시간 창(Window) 구성

주요 지진사건 부근에 인접한 인접공간-시간창 (Local Window)과 인접공간-시간창을 포함하는 확장공간-시간창(Extended Window)을 구성하고 인접공간-시간창의 통계적 특성과 확장공간-시간창의 통계적 특성을 비교하여 인접공간-시간창이 지진군집을 포함할 가정에 대해 통계검증을 수행한다.

(나) 군집의 형태 및 크기 추정

인접공간-시간창 내의 군집이 확인되면 시간 및 공간축으로 창을 확장시키며 군집의 형태와 크기를 추정한다.

(다) 군집영역 내부의 2차사건 분리

확장공간-시간창의 포아송 과정을 인접공간-시간창 내에서 시뮬레이션한 후 시뮬레이션 된 지진사건과 공간-시간축 상으로 가장 가까운 지진을 주요사건으로 분리하고 나머지는 2차 사건으로 분리한다.

지진군집성 분석결과 수집된 2,502개의 지진기록을 그림 1(a)에 나타난 1,235개의 주요지진으로 분류하였다. 그림 1(b)는 규모가 확인되지 않은 지진기록까지도 포함하는 지진발생사건이 표시되어 있다. 지진기록 초반부 (AD 1000 ~ 1392) 및 일부 시기 (AD 1750 ~ 1905)에 불완전성이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 그림 2는 대표적인 군집성 분석 결과를 공간적으로 보여주고 있다. 분석결과 군집의 시간 및 공간적 형태가 일정치 않았다.

2.4 지진카다로그의 불완전성 (Incompleteness) 정량화

식 (4)에서 지진카다로그의 불완전성 정량치인 지진탐지확률(Probability of Earthquake Detection: P_D)를 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 그림 3에 나타나 있다. 지진발생시기는 도표 1과 같이 지진카다로그 내의 지진발생 통계적 특성 및 역사적인 사건으로 구분되는 4개의 시기로 구분되었다. EQHAZARD 방법에 의해 P_D 를 계산하기 위해 다음과 같은 제약조건이 주어진다.

(가) P_D 는 규모 (m), 시기 (t)에 대해 단조증가 함수이다.

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

(다) $0 \leq P_D \leq 1$

국내 지진카다로그 지진의 완전성은 시간이 지남에 따라 단조증가하는 국외 지진카다로그의 완전성 특성과는 다른 특성을 갖기 때문에 제약조건 (가)는 국내에 적용될 수 없고, 각 시기별로 전 시기까지의 지진탐지확률을 고정시키고 지진탐지확률에 대한 단계적인 계산이 수행되었다. 도표 1에는 시기 및 규모별 P_D 추정값이 표시되어 있다. 도표 1에 나타난 바와 같이 한반도 지진 카다로그는 규모 4.5의 지진에 대해 시기 1000~1392, 1905~1989에 대해 완전하였다.

2.5 지진파라미터 추정 및 불확실성 평가

지진카다로그에 대한 지리적 위치, 지진규모, 시기에 대한 지진탐지확률이 결정되면 지진원에 대한 지진파라미터인 $a(x)$, $b(x)$ 을 추정할 수 있다. EPRI EQHAZARD 방법에서는 동일 지진원 내에서 비균질한 지진파라미터 값을 허용하며, 지진원을 그림 3과 같이 설정하였을 때 평활화 정도에 의한 a , b 의 분포는 그림 4와 같다. a , b 값은 격자에 따라 불균질한 값을 갖으며 0.6과 1.0사이의 제한된 범위에 존재하였다. 위도 36.5° , 경도 127.7° 로 대표되는 격자내의 a , b 에 대한 신뢰도를 평가하기 위해 부트랩 시뮬레이션 (Bootstrap Simulation)을 이용하여 a , b 에 대한 누적 확률분포를 계산하였으며 그림 5에 결과가 표시되어 있다.

3. 결론

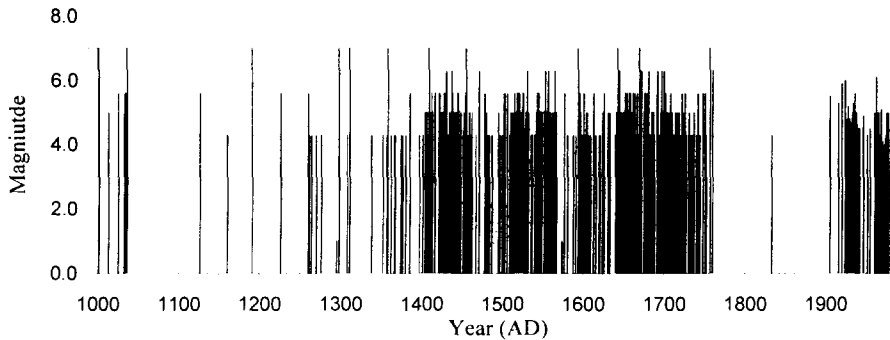
본 연구에서는 EPRI EQHAZARD PSHA 방법론에 의해 한반도 지진카다로그에 수록된 지진에 대한 군집성 분석을 수행하여 군집성 내부의 2차 사건 및 중복사건을 제거하였다. 분류된 주요 지진사건에 대해 불완전성 분석이 수행되었으며 국내 지진카다로그 자료는 시기 1392 ~ 1750년 1905 ~ 1989년, 규모 4.5이상의 지진에 대해 완전하였다. 불완전성을 고려하여 국내지역에 대해 지진파라미터를 추정한 결과 b 값은 0.6 ~ 1.0 사이에 존재하였다.

4. 참고문헌

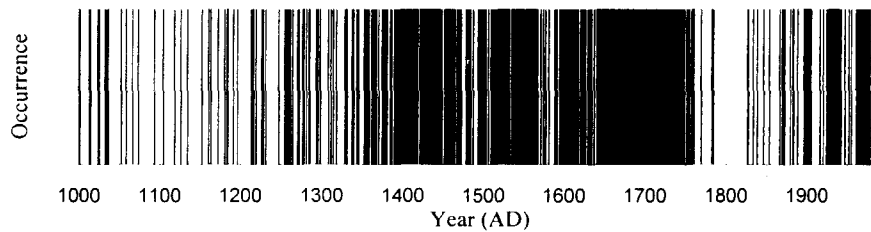
1. Electric Power Research Institute (1986), Applicability of the Poisson Earthquake-Occurrence Model.
2. Electric Power Research Institute (1989), EQHAZARD Primer.
3. Electric Power Research Institute (1989), Seismic Hazard Methodology for the Central and Eastern United States, Volume 1 (Theory), Part 1.
4. Electric Power Research Institute (1989), Seismic Hazard Methodology for the Central and Eastern United States, Volume 2, Revision 1.
5. Electric Power Research Institute (1989), Seismic Hazard Methodology for the Central and Eastern United States, Volume 3 (User's Manual), Revision 1.
6. Korea Electric Power Research Institute (1992), Level I probabilistic Safety Assessment for Yonggwang Units 1 & 2 (Final Report).
7. Korea Electric Power Research Institute (1997), International Workshop & Seminar on Probabilistic Seismic Hazard Analysis.
8. Leon Reiter (1990), Earthquake Hazard Analysis, Columbia.
9. Seismological Research Letters (January/February 1997), Volume 68, Number 1, Seismological Society of America.

Magnitude	Time Period (AD)			
	1000 - 1392	1392 - 1750	1750 - 1905	1905 - 1989
3.3 - 3.9	0.02	0.00	0.00	0.03
3.9 - 4.5	0.03	0.64	0.01	0.14
4.5 - 5.1	0.03	1.00	0.01	1.00
5.1 - 5.7	0.13	1.00	0.09	1.00
5.7 - 6.3	0.13	1.00	0.09	1.00
6.3 - 6.9	0.13	1.00	1.00	1.00
6.9 - 7.5	1.00	1.00	1.00	1.00

Table 1. A table to show the Probability of Detection for a set of earthquake magnitude and time period. Shaded areas mean that the corresponding earthquake magnitude and time period is complete.



(a) Earthquake main events in a combined earthquake catalog



(b) Earthquake occurrences that include earthquakes of unknown magnitude

Figure 1. Main earthquakes events in a combined earthquake catalog of Korea. Main earthquakes are obtained by earthquake clustering analysis using EQHAZARD. Incompleteness of main earthquake events are clearly seen for the time periods of 1000 - 1392 (AD) and 1750 - 1905 (AD).

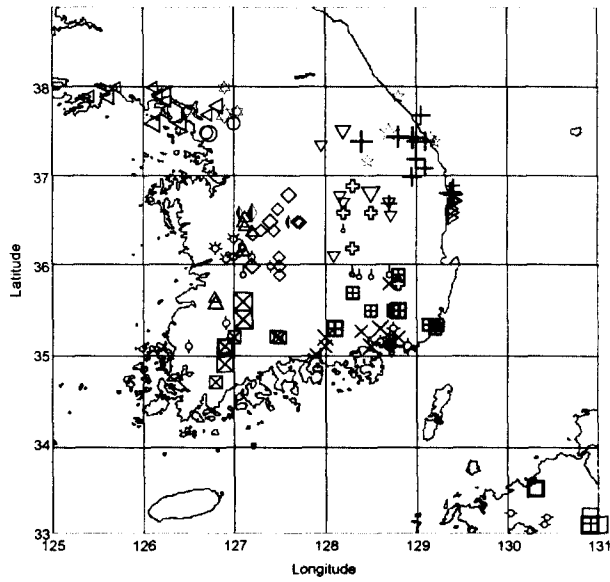


Figure 2. Result of earthquake clustering analysis in geographic space. Same symbols in the figure belong to an earthquake cluster with the size of symbols proportional to the earthquake magnitudes.

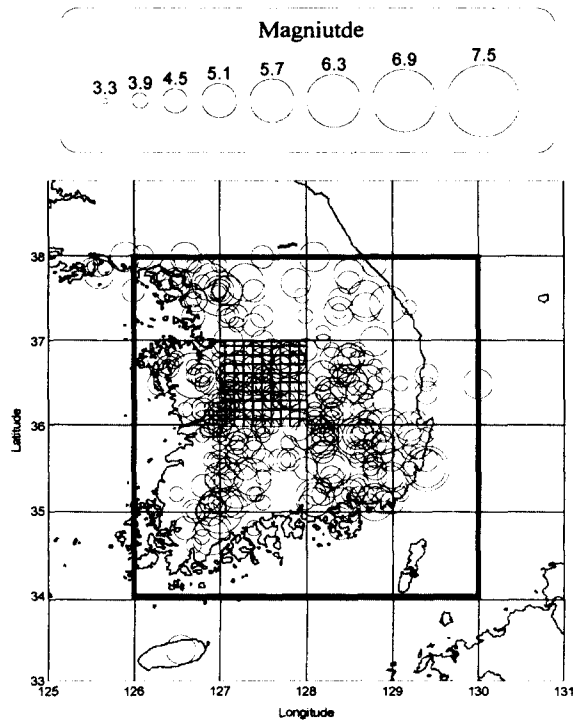
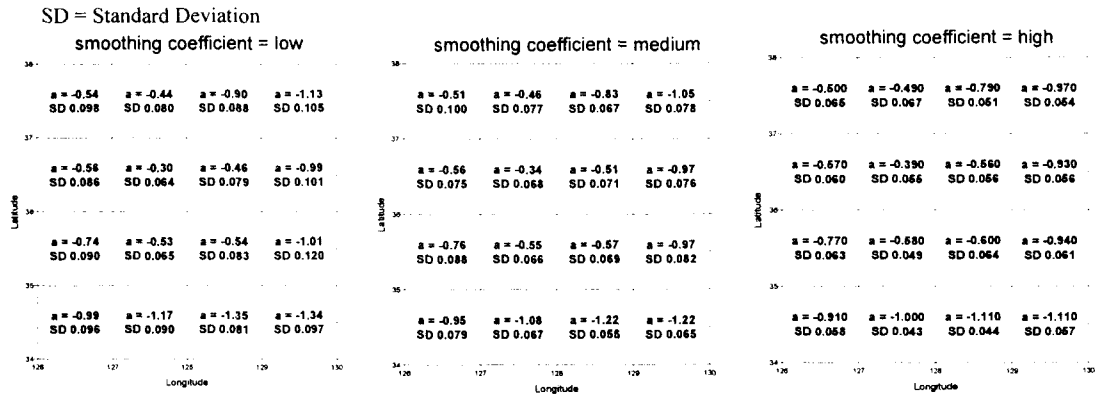
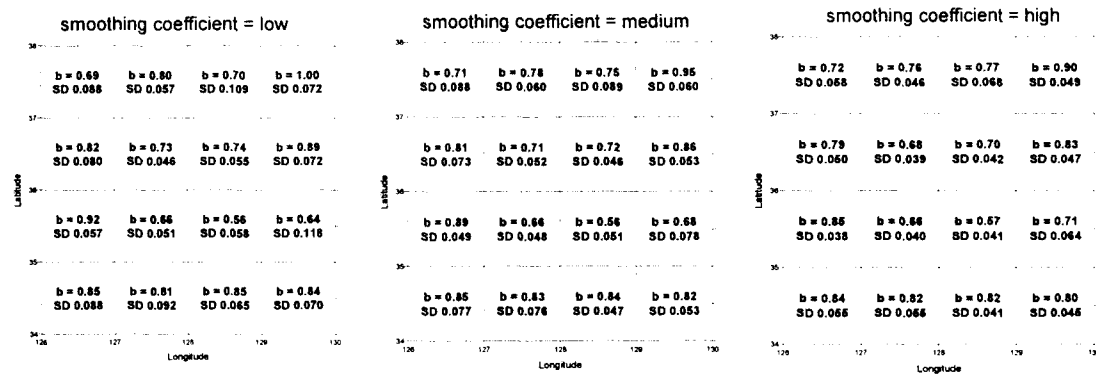


Figure 3. Earthquakes in the combined earthquake catalog between 1392 - 1750 AD. Thick Solid line represents a region for the incompleteness study and estimation of seismicity parameters. Symbol \blacksquare is used for the evaluation of a- and b-value. (See Figure 5)



(a) Estimated a-values corresponding to a specified smoothing coefficient



(b) Estimated b-values corresponding to a specified smoothing coefficient

Figure 4. Estimated values of seismicity parameters of a- and b-value smoothed within a seismic source corresponding to specified smoothing coefficients.

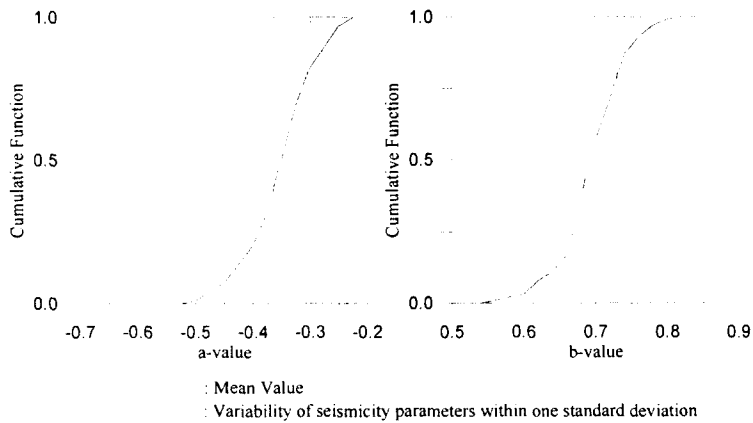


Figure 5. Cumulative distributions of seismicity parameters of a- and b-value for the area within a rectangular grid of symbol \boxtimes in Figure 3.