

'98 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

한반도의 역사지진 카타로그에 나타난 지진학적 특성에 관한 분석

Analysis on the Seismological Characteristics in Korean Earthquake Catalogs

민 경식

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

지진 카타로그가 원자력발전소의 지진에 대한 위험성 평가에 미치는 중요성을 고려하여 현존하는 지진 카타로그 중 가장 자주 사용되는 이 기화의 지진 카타로그와 지진공학회의 지진 카타로그를 비교하였다. 두 카타로그는 전체 지진 빈도수에서 뿐만 아니라 동일한 지진에 대한 진도평가에서 상당한 차이를 보여주었다. 전체적으로 이 기화의 카타로그가 지진공학회의 카타로그에 비하여 동일한 지진에 대한 진도를 높게 평가하였다. 지진 카타로그로부터 계산된 지진 파라미터는 두 카타로그 모두 세계적 평균 및 한반도 주변부의 계기지진 분석 결과와 상당한 값의 차이를 보이는 가운데 이 기화의 카타로그가 지진공학회의 카타로그보다 나은 결과를 나타낸다. 지진공학회의 카타로그를 이용한 주기성 분석에서 우리나라의 지진은 특징적인 주기성을 갖지 않는 것으로 나타났다.

Abstract

Considering the importance of the earthquake catalog for the risk analysis of nuclear power plants against hazardous earthquakes, comparison of two catalogs, KWL(Kiwha Lee)'s and EESK(Earthquake Engineering Society of Korea)'s which are the two most frequently used nowadays, was performed. Two catalogs show the difference in the frequency of occurrence and in an intensity evaluation for the same earthquakes as well. Generally, KWL's catalog shows higher intensity values than the EESK's catalog. Seismic parameters calculated from the catalogs show that KWL's parameters are closer to the worldwide average and the result from the instrumental data near Korean peninsula, while both figures are not close enough to the world average. Harmonic analysis of the EESK's catalog does not show any clear characteristic periodicity in the earthquakes near Korean peninsula.

1. 서론

일반적으로 잘 알려진 바와 같이 지진은 Elastic Rebound Theory에 의한 지각에서의 응력의 방출로 설명되어 진다. 즉, 지진은 대부분의 경우, 지각이 Tectonic movement에 의하여 쌓인 응력을 견디지 못하고 급작스럽게 파쇄될 때 발생한다. 따라서 전 세계적으로 지진의 대부분은 이러한 응력이 쌓이기 쉬운 장소, 즉 Tectonic boundary에서 주로 발생한다. 이러한 현상을 Interplate seismicity라 한다. 따라서, Tectonic boundary를 제외한 지역에서의 지진 발생 빈도는 현저하게 떨어진다. 그럼에도 불구하고 Tectonic boundary로부터 떨어진 지역(Intraplate)에서도 역사적으로 대규모의 피해를 동반하는 지진이 발생하였음은 주지의 사실이다.

원자력발전소에서의 내진설계에 있어서 중요한 입력자료는 주어진 기간동안 발생 가능한 최대지진의 크기 및 특성이다. 원자력발전소의 경우 최대지진의 크기 및 특성은 두가지 방법에 의하여 결정된다. 첫 째는 보수적인 방법으로써 과거의 자료를 활용하여 앞으로 발생 가능한 최대지진을 산정하는 방법이다. 우리나라의 원자력발전소에서 사용하고 있는 이 방법의 장점은 명확하게 최대지진이 정량화되어 이를 곧바로 설계에 적용할 수 있다는 점에 있다. 반면, 과거의 지진을 어떻게 해석하느냐에 따라 최대지진의 크기가 달라질 수 있고 짧은 기록을 외삽(extrapolation)하는데 따른 오차의 증폭 가능성이 있다. 두 번째 방법은 PSHA라 불리는 일종의 확률재해분석 기법이다. 우리나라의 원자력발전소의 경우 이 방법을 최대지진 산정의 보조수단으로 사용하고 있으며 원전의 내진설계를 포함한 중대사고 예방설계를 하는데에 사용되는 PSA(Probabilistic Hazard Analysis)의 입력자료로 사용되고 있다. 이 방법은 현실적으로 국내 지진재해확률의 경우 불확실성이 매우 커서 그 이용에 많은 제약이 따른다는 단점이 있다. 이러한 단점에도 불구하고 PSHA 기법은 과거의 지진 이력에 대한 해석을 달리하더라도 이를 모두 수용하여 하나의 확률분포로 나타낼 수 있는 장점이 있으며 곧바로 PSA 기법과 연결이 가능하다는 점이 있어서 PSHA 기법을 이용한 원자력발전소의 내진설계가 점차로 일반화되는 추세에 있다.

PSHA는 동일한 지진발생 특성을 갖는 지진지체구조구에서 발생한 지진이 부지에 미치는 영향을 계산, 각각의 지진지체구조구에서의 영향이 총체적으로 부지에 어떠한 영향을 미치게 되는지를 확률적으로 표시하는 기법이다. 즉 각각의 지진지체구조구에서의 지진특성(발생빈도, 최대지진 등)이 확률론적 함수로 표현되고 이러한 함수의 집합(합산)이 발전소의 부지에 미치는 영향을 평가하는 것이다. 여기에서 필요로 하는 것이 지진지체구조구로부터 발생한 지진이 발전소 부지에 도달하는데 소요되는 감쇠모델이다. 따라서 원자력발전소의 내진설계를 위한 PSHA에서 필요한 입력자료로는 지진지체구조구, 각 지진지체구조구 내의 지진파라미터(a 및 b 값), 최대지진, 최대지진의 깊이, 지진파 감쇠모델 등이다. 이러한 입력자료를 구하는데 필요한 자료로서는 지진 카타로그, 지진지체구조구의 지구물리학적 특성 또는 지진원의 특성, 진도-규모 환산식, 지각 구조, 지진 발생 특성 등 지진학의 거의 대부분에 관한 정보가 포함되나 이 중 가장 기초적인 자료가 지진 카타로그이다. 본 논문에서는 현존하는 지진 카타로그 중 가장 자주 사용되고 있는 이 기화의 지진 카타로그와 지진공학회의 지진 카타로그를 분석·비교하여 그 특성을 파악하고자 하였다.

2. 지진 카타로그

PSHA 분석을 위하여 전문가가 제시하는 입력자료 중 중요한 파라미터는 크게 지진원, 지진파라미터, 그리고 감쇠공식이 있다. 이 중 지진원과 지진파라미터는 한반도의 지진 카타로그와 밀접한 관련이 있다. 우리나라의 경우 지진을 일으키는 지구물리학적 특징(예를들면 활성단층 등)을 명확히 나타내는 지진지체구조가 설정되지 않아 전문가가 제시하는 지진원의 대부분이 지진발생다발지역을 근거로 하고 있으며 가능 최대지진을 포함한 지진파라미터 또한 지진 카타로그로부터 계산되기 때문이다.

한반도 주변부에서 발생한 역사지진을 포함한 지진 카타로그는 여러 종류가 있다. 따라서 어떠한 지진 카타로그를 취하느냐에 따라 지진원과 지진파라미터가 달라질 수 있다. 우리나라에는 김 소구(1978), 서 정희(1978), 엄 상호(1983), 지진공학회(1997), 이 기화(1998) 등이 발간한 지진 카타로그가 있으나 여기에서는 가장 대표적인 두 개의 지진 카타로그, 즉 이기화의 지진 카타로그(1998)와 지진공학회의 지진 카타로그(1997)를 비교하여 분석하고자 한다.

3. 지진발생 빈도 및 규모

우선 동일한 시기(서기 2년 ~ 1905년)에 대한 지진발생 빈도는 이기화의 지진 카타로그의 경우 1895회에 이르나 지진공학회의 지진 카타로그에는 389회에 불과하다. 표 1은 각각의 카타로그에 제시된 진도별 지진의 빈도수이다. 표 1에 나타난 바와 같이 이 기화의 지진 카타로그에서 진도가 결정되지 않는 1008회를 제외하더라도 이 기화의 지진 카타로그 상 지진으로 제시된 이벤트가 지진공학회의 카타로그 상 지진으로 제시된 이벤트의 2배에 이른다. 이러한 차이는 일부 진앙지 결정에서의 차이(예를들면 진앙지가 중국에 존재한다고 평가할 경우에는 제외)를 감안하더라도 큰 편이라 할 수 있다.

MMI	이 기화	지진공학회	비율 $\left(\frac{\text{지진공학회의 빈도수}}{\text{이 기화의 빈도수}} \right)$
X	1	0	0
IX	41	10	0.24
VIII	27	19	0.70
VII	113	16	0.14
VI	243	123	0.51
V	462	221	0.48
Undetermined	1008	-	-
Total	1895	389	0.21

표 1. 이 기화의 지진 카타로그와 지진공학회의 지진 카타로그의 비교.

또한 중규모 이상의 피해를 나타내는 MMI VII 이상의 지진 빈도수는 이 기화의 지진카타로그에 의하면 182회가 기록되어 있으나 지진공학회의 지진카타로그에 의하면 45회에 불과하여 그 차이

가 거의 4배에 이른다. 이러한 차이는 지진재해도를 통계학적으로 해석하는데 있어서 발생 최대지진(이 기화의 경우 MMI X, 지진공학회의 경우 MMI IX)의 차이에 의한 영향보다 훨씬 더 큰 영향을 미칠 수 있다. 그림 1은 두 카타로그상에서 공통된 지진, 즉 발진시각과 진앙지가 동일한 것으로 판단되는 지진만을 선정(360개)하여 각각의 지진에 대한 MMI 평가를 비교한 그림이다. 그림 1은 두 카타로그 모두 진도 V의 지진에 대한 평가는 대체로 일치하는 것으로 보인다. 그림 1에서 원의 크기는 해당 MMI의 횟수를 나타낸다. 즉 이 기화(KWL - x 축)에 의하여 MMI V로 평가되었고 지진공학회(SEE - y 축)에 의하여서도 MMI V로 평가된 지진이 그림 1의 가장 커다란 원에 해당하며 이는 양 카타로그가 진도 V로 평가한 지진이 다른 지진에 비하여 상대적으로 많다는 것을 의미한다.

이 기화에 의하여 진도 VI으로 평가되었으나 지진공학회에 의하여 진도 V로 평가된 지진의 횟수와 그 반대(즉 지진공학회가 VI으로 평가하였으나 이 기화는 진도 V로 평가한 지진)의 경우는 서로 비슷하다. 그러나 이기화의 카타로그에서의 진도 VII의 지진은 지진공학회의 카타로그상에서는 전반적으로 진도 V 또는 VI으로 나타나고 있다. 이러한 평가상의 차이는 역사서적 상의 지진 피해 및 감진범위에 대한 서술을 해석하는 차이에서 발생하고 있다. 또한 이 기화의 지진카타로그 상에서의 상당수의 진도 IX(9개)의 지진이 지진공학회 지진카타로그에서는 진도 VIII로 평가되어 있다. 이렇듯 전반적으로 이 기화의 지진카타로그가 지진공학회의 지진카타로그에 비하여 그 진도 평가에 있어서 다소 높은 값을 보이고 있으며 선형 Regression model을 사용할 경우

$$I_{KWL} = 0.46 \times I_{SEE} + 2.84$$

의 관계식으로 표시된다. 이는 전반적으로 이기화의 지진카타로그가 지진공학회의 지진카타로그보다 상대적으로 동일한 지진에 대하여 진도를 높게 평가하고 있다는 점을 보여주고 있다. 이러한 평가는 특히 피해가 심한 지진, 그리고 감진면적이 넓은 지진의 경우에 두드러지게 나타난다.

4. 지진파라미터

Gutenberg와 Richter는 지진의 발생빈도와 규모 사이에는 일정한 관계가 있음을 보여주었다. 지진파라미터로 알려져 있는 규모-빈도 관계식의 상수 a와 b는 특정 지역의 지진발생 특성과 관련이 있을 뿐만 아니라 재래주기를 평가하는데 중요하며 따라서 확률론적 지진재해도 평가에 있어서 매우 중요한 인자가 된다. 규모-빈도 관계식의 기울기 b는 일반적으로 전 세계적으로 약 1.0에 가까운 값을 가진다(그림 2). 그림 2는 1996년 1/4분기 중 미국 USGS Network에 기록된 지진의 b값을 보여주고 있다.

그림 3은 이 기화 및 지진공학회의 지진 카타로그를 사용하여 한반도 전체의 b 값을 계산한 것이다. MMI를 규모로 환산하기 위하여

$$M = \frac{2}{3} I + 1.0$$

을 사용하였다.

그림 3에 나타난 바와 같이 b 값은 각각 0.78 및 0.59로 Intraplate에서의 일반적인 b 값인 1.0과는 상당한 차이가 있다. 이는 진도-규모 환산식의 부정확함 이외에도 지진 카타로그 상에서 상당

량의 소규모 지진이 누락되어 있거나 일부 지진이 과대평가되었음을 암시한다. 참고로 독일의 경우 동일한 진도-규모 환산식을 사용하였을 경우 역사지진에 의한 b 값은 0.9, 1996년 1/4분기 중 미국 USGS Network에 기록된 지진의 b 값은 1.0, 그리고 1975년부터 1996년 8월까지 서울을 반경으로 300 km 이내에서 발생한 지진에 대한 미국 USGS의 지진 카타로그에서 취한 규모 4.3(m_b) 이상의 지진에 의한 규모-빈도 관계식은 1.0에 가까운 b 값을 나타낸다(그림 4 및 그림 5).

b 값이 불완전한 지진 카타로그에 의하여 일반적인 값(1.0)과 상당히 차이를 보이는 경향은 규모의 결정과 매우 밀접한 관계가 있다. 예를들면 규모의 계산에 약간의 오류를 나타내었던 CTBT를 위한 IMS 설치 및 시험 운용시 보여준 REB의 b 값(1.5)은 동일 기간 · 동일지역의 USGS의 b 값(1.0)과 커다란 차이를 나타낸다.

5. 주기성

일반적으로 주어진 자료의 주기성을 알아보기 위해서 패스트 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)을 사용한다. 그러나 패스트 푸리에 변환은 한정된 자료(finite number of data)를 무한대로 가정하여 분석하기 때문에 통계학적으로 불안정하다. 그 결과로서 패스트 푸리에 변환은 일반적으로 분산(Variance)이 매우 크며 Noise가 많을 경우 주어진 자료의 주기성을 파악하기 힘들다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 사용하는 방법이 Periodogram을 이용한 주기의 분석이다. Periodogram을 이용한 주기의 분석에는 Parametric method와 Non-parametric method가 있는데 parametric method란 일종의 평균기법으로 분산을 줄이는 방법이며 Non-parametric method란 일종의 필터링 기법으로 주어진 자료를 가장 적합하게 표현할 수 있는 모델을 개발하는 방법이다.

Parametric method로서는 Daniel periodogram, Bartlett periodogram, Welch periodogram 등 eperiodogram에 의한 방법이 있으며 Non-parametric method로는 Autoregressive(AR) method, Moving Average(MA) method, 양자의 혼합형인 ARMA method 등이 있다. 여기에서는 Non-parametric method로서 가장 자주 사용되는 AR기법 중 Burg method를 사용하여 한반도 지진의 주기성을 분석하고자 한다. 자료로는 지진공학회의 지진 카타로그로부터 추출한 지진의 발생 빈도 및 발생 빈도와 진도로부터 유도된 에너지를 사용하였다. 에너지 유도에는 $M=1.0+\frac{2}{3}I$ 및 $\log E=12.44+1.44M$ 으로부터 유도한 $E=10^{13.68+0.96I}$ 를 사용하였다. 발생 빈도 및 에너지는 항상 양의 값을 가지므로 DC(Direct Current) term에 의한 영향을 제거하기 위하여 자료를 미분한 값을 사용하였다. 자료의 분석은 서기 0년부터 1024년까지를 기준으로 64년씩 이동하여 1905년까지 시도하였다.

그림 7은 지진 빈도 및 에너지 분포(그림 6)에 대하여 AIC(Akaike Index Criteria) 분석을 통하여 AR의 order를 10으로 놓고 계산한 Power Spectral Density이다. 그림 7에 나타난 바와 같이 우리나라의 지진은 특정한 주기를 가지고 반복되는 것으로 나타나지는 않는다. 비록 그림 7에는 8년의 주기성이 나타나기는 하나 이는 자료의 정확성에 커다란 영향을 받으므로 우리나라의 지진이 8년의 주기성을 가지고 있다고 말하기는 어렵다. 이러한 단주기 성분에 관한 신뢰도는 자료의 정밀도와 밀접한 관련이 있기 때문이다. 장주기 성분의 Power Spectral Energy가 전체적으로 높

은 경향을 보이고 있음이 특이하다.

결론

지진 카타로그가 원자력발전소의 지진에 대한 위험성 평가를 위한 PSHA에 미치는 중요성을 고려하여 현존하는 지진 카타로그 중 가장 자주 사용되는 이 기화의 지진 카타로그와 지진공학회의 지진 카타로그를 비교한 결과 다음과 같은 결론이 유도되었다.

1. 두 카타로그는 이 기화의 카타로그 중 진도가 결정되지 않은 1000여회를 제외하고도 지진발생 빈도수에서 2배 이상의 차이를 보이고 있다.
2. MM 진도 VII 이상의 지진 발생빈도를 비교할 경우 이 기화의 카타로그는 지진공학회의 카타로그보다 4배가 많았다.
3. 동일한 지진에 대한 평가 결과 MM 진도 V의 경우는 거의 비슷하였으나 이 기화의 카타로그 상 진도 VII의 것 중 상당 수가 지진공학회에서는 진도 V 또는 VI으로 평가하였다.
4. 전체적으로 이 기화의 카타로그가 지진공학회의 카타로그보다 동일한 지진에 대한 진도 평가가 크다.
5. 두 카타로그 모두 지진 파라미터의 평가에는 적합하지 않다. 다만 이 기화의 카타로그가 지진공학회의 카타로그보다 전 세계 평균치에 가까웠다.
6. 지진공학회의 카타로그를 이용하여 한반도 지진의 주기성을 평가한 결과 한반도에서 발생한 지진은 특정한 주기성을 보이지 않았다.

참고문헌

1. 연관희, 이종립, 1998, EQHAZARD를 이용한 한반도 지진파라미터 추정, 한국지진공학회 춘계 학술대회 논문집, p. 31-38.
2. GSE/FR/31, 1996, Some Comments on REB mb Magnitudes.
3. Guenter Leydecker, 1986, Erdbebenkatalog fuer die Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten fuer die Jahre 1000-1981, Geologisches Jahrbuch. 83 pp.
4. Marple, 1987, Digital Spectral Analysis with Applications, Prentice-Hall, 492pp.
5. '98전력연-단517, 1998, 지진재해도평가의 불확실성 개선에 관한 연구(2차년도 중간보고서), 전력연구원, 309pp.
6. 엄 상호 외, 1983, 한반도의 지진위험도, 한국동력자원연구소, 295pp.
7. 이 기화, 한반도 역사지진 및 일제시대 계기지진 분석, 한국원자력연구소, 98pp.

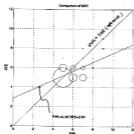


그림 1. 동일지진에 대한 진도평가 비교(이 기화-지진공학회)

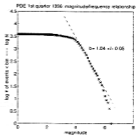


그림 2. USGS 관측망에 기록된 지진(1996년 1/4분기)의 b 값.

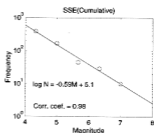
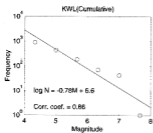


그림 3. 두 역사지진 카타로그를 이용한 b 값 계산. KWL - 이 기화, SSE - 지진공학회.

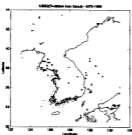


그림 4. USGS 관측망에 기록된 한반도 부근(서울 중심 반경 300 km 이내)의 지진 (1975-1988).

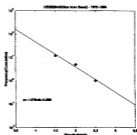


그림 5. USGS 기록을 근거로 계산한 한반도의 b 값.

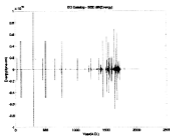


그림 6. 지진공학의 카타로그를 근거로 한 한반도의 지진에너지 방출(비분값).

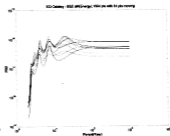


그림 7. 지진공학의 카타로그를 근거로 한 한반도 지진의 주기성.