지진재해도의 백분위수 분석 방법 비교

Comparison of Methods for the Analysis Percentile of Seismic Hazards

이현미¹⁾ · 서정문²⁾ · 김민규³⁾ · 최인길⁴⁾

Rhee, Hyun-Me · Seo, Jung-Moon · Kim, Min-Kyu · Choi, In-Kil

국문 요약 >> 확률론적 지진재해도 분석은 지진자료에 내재된 필연적인 불확실성을 효과적으로 반영하기 위한 방법으로, 다수의 지진 지체 모델과 감쇄식이 가중치와 함께 고려된다. 확률론적 지진재해도 분석을 통하여 산출된 재해도는 일반적으로 최대지반가속도에 대한 값으로, 연초과확률로 표시된다. 또 다수의 지진자료에 의해 발생하는 재해도의 불확실성 범위를 표시하기 위하여 평균 재해도 곡선뿐 아니라 15, 50, 85 백분위수의 곡선도 함께 도시한다. 따라서 백분위수는 산출된 재해도의 불확실성 범위를 나타내는 중요한 역할을 수행하게 되며 지진자료에 의한 가중치와 산출된 재해도의 관계를 이용한 여러 가지 방법에 의해 계산된다.

본 연구에서는 백분위수 분석 방법으로 중요도 누적법, 재해도 가중법, 최우법, 적률법을 선정하여 신울진 1,2호기의 확률론적 지진재해도 분석으로 산출된 재해도의 백분위수를 계산 하였다. 전반적으로 중요도 누적법, 재해도 가중법, 최우법으로 계산된 백분위수 곡선의 경향이 유사하게 나타났으며 실제 산출된 전체 재해도의 특성을 잘 반영하였다. 적률법으로 계산된 백분위수는 평균 재해도에 가장 큰 영향을 미치는 부지를 포함한 지진원에 대한 재해도를 효과적으로 나타냈다. 본 연구에서는 전체 지진원과 부지를 포함한 지진원에 대한 평균 재해도가 거의 같게 나타나는 점을 고려하여 부지를 포함한 지진원의 재해도를 백분위수에 잘 반영하는 적률법을 효과적인 백분위수 산출방법으로 제시하였다.

주요어 백분위수, 불확실성 범위, 중요도 누적법, 재해도 가중법, 최우법, 적률법

ABSTRACT >> Probabilistic seismic hazard analysis (PSHA), which can effectively apply inevitable uncertainties in seismic data, considers a number of seismotectonic models and attenuation equations. The calculated hazard by PSHA is generally a value dependent on peak ground acceleration (PGA) and expresses the value as an annual exceedance probability. To represent the uncertainty range of a hazard which has occurred using various seismic data, a hazard curve figure shows both a mean curve and percentile curves (15, 50, and 85). The percentile performs an important role in that it indicates the uncertainty range of the calculated hazard, could be calculated using various methods by the relation of the weight and hazard.

This study using the weight accumulation method, the weighted hazard method, the maximum likelihood method, and the moment method, has calculated the percentile of the computed hazard by PSHA on the Shinuljin 1, 2 site. The calculated percentile using the weight accumulation method, the weighted hazard method, and the maximum likelihood method, have similar trends and represent the range of all computed hazards by PSHA. The calculated percentile using the moment method effectively showed the range of hazards at the source which includes a site. This study suggests the moment method as effective percentile calculation method considering the almost same mean hazard for the seismotectonic model and a source which includes a site.

Key words Circular hollow reinforced concrete column, Lateral confining effect, Nonlinear FEM analysis, Seismic performance evaluation

1. 서론

지진재해도 분석은 미래의 특정 기간과 장소에서 발생 가능한 지진의 초과확률이나 빈도를 추정하는 것으로, 지진의 발생 및 전파 과정에 대한 평가가 필요하다. 이를 위해서는 지질학적인 특성, 역사 및 계기 지진기록, 활성단층에 대한 정보, 감쇄특성 등이 고려되어야 한다. 지진재해도 분석에

¹⁾ 정회원·한국원자력연구원 종합안전평가부 석사후연수생
(교신저자: grayrainy@nate.com)

²⁾ 정회원·한국원자력연구원 종합안전평가부 전문역, 공학박사

³⁾ 정회원·한국원자력연구원 종합안전평가부 선임연구원, 공학박사

⁴⁾ 정회원·한국원자력연구원 종합안전평가부 책임연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2011년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 10. 12 / 수정일 2010. 1. 3 / 게재확정일 : 2011. 1. 4)

고려되는 여러 자료들은 동일한 자료에 대해서도 전문가에 따라 의견이 상이하게 나타나고, 특히 역사지진에 대한 자료는 그 정량적인 평가에 대한 신뢰성이 부족하여 불확실성이 크게 나타나고 있다. 기존의 결정론적인 지진재해도 분석 방법으로는 이러한 지진자료들의 불확실성에 대한 충분한 고려가 불가능하기 때문에, 지진재해도 분석에 자료의 불확실성을 효과적으로 반영할 수 있는 새로운 방법의 필요성이 제기되었다.

미국에서도 1886년 Charleston 지진 이후 미국 중동부 지역에 대한 지진재해도분석에 확률론적인 평가의 필요성이 제기되었고⁽¹⁾, 1997년 Regulatory Guides (R.G.) 1.60⁽²⁾을 개정하여 확률론적인 방법에 따라 안전정지지진(SSE, Safe Shutdown Earthquake)을 결정하는 방법을 허용하였다. 그리고 2007년 3월에는 R.G. 1.208⁽³⁾을 제정하여 R.G. 1.165⁽⁴⁾에 대한 대안으로서 성능기반 설계지반 운동을 결정하는 방법을 허용하였다. 우리나라에서는 원자력발전소 건설을 위해 1986년부터 현재까지 원자력발전소 부지에 대해 10여회 이상의 확률론적 지진재해도분석(PSHA, Probabilistic Seismic Hazard Analysis)을 수행하여 왔다. 이 밖에 건설교통부에서는 1997년에 일반 산업시설 및 건물의 내진설계 기준을 제정하면서 확률론적 지진재해도분석을 수행하여 우리나라의 지진재해도 지도를 작성하였다.⁽⁵⁾ 확률론적 재해도분석은 다양한 전문가들의 의견과 연구결과를 바탕으로 지진자료의 불확실성을 효과적으로 반영할 수 있지만 그 입력변수들의 편차가 클 경우 오히려 재해도의 불확실성을 증가시킬 수 있다. 따라서 시설의 설계나 리스크 평가에 사용되는 지진재해도의 불확실성을 줄이기 위하여 입력변수의 불확실성을 줄이기 위한 노력이 수행되어 왔다. 서정문 등⁽⁶⁾은 국내 지진학 전문가 패널을 구성하여 지진재해도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단되는 Gutenberg-Richter a-b값과 지진지체구조에 대한 평가를 수행하였다. 그 결과로 Gutenberg-Richter b값의 상·하 한계값과 평균값을 제시하였으며 4개의 지진지체모델을 선정하여 재해도의 불확실성 범위를 줄였다.

확률론적 지진재해도분석을 통해 산출된 재해도는 최대 지반가속도에 대한 연초과확률값(Annual Exceedance Probability)으로 평균 재해도 곡선 뿐 아니라 15, 50, 85 백분위수(Percentile)에 해당하는 재해도 곡선도 함께 도시하여 다중의 입력변수에 의해 발생하는 불확실성 범위를 표시한다. 따라서 백분위수는 산출된 재해도의 불확실성을 나타내는 중요한 역할을 한다. 이러한 백분위수 산출은 재해도 산출에 사용되는 프로그램에 따라 다른 방법이 사용되고 있으

며, 예를 들어 프로그램 EQRISK의 경우 중요도 누적법을 사용하여 재해도의 백분위수를 산출하고 있다. 지난 2004년 발간된 일본원자력학회표준에서는 중요도 누적법, 최우법, 적률법을 사용하여 재해도의 백분위수를 산출하였으며 각 방법에 따른 결과의 차이를 바탕으로 통계처리법 적용에 대한 충분한 검토가 필요함을 밝혔다.⁽⁷⁾ 그러나 일본원자력학회 표준에서는 각 방법론에 대한 간단한 설명과 그 결과 계산된 백분위수의 그림만 도시되어 있을 뿐 자세한 설명이 포함되어 있지 않으며, 국내에서는 각 방법에 따른 백분위수의 차이에 대한 연구가 수행되지 않아 각 방법이 백분위수 산출에 미치는 영향이 뚜렷하지 않다. 따라서 본 연구에서는 재해도의 백분위수 산출에 중요도 누적법, 재해도 가중법, 최우법과 적률법을 적용하여 각 통계처리법이 지진재해도 곡선의 불확실성 범위를 결정하는 데에 미치는 영향을 비교하여 가장 타당하다고 판단되는 방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해 신울진 1,2호기 원자력발전소 부지를 대상으로 선정하여 확률론적 지진재해도분석을 수행하고⁽⁸⁾ 백분위수를 산출하였다. 재해도 가중법은 일반적인 재해도 결과로 제시하는 평균 재해도가 각 재해도와 그 가중치의 곱의 합이라는 점에 착안하여 고안된 방법으로, 본 연구의 백분위수 산출방법으로 추가하였다.

2. 백분위수 산출방법

본 연구에서는 재해도의 백분위수를 산출하는 방법으로 중요도 누적법, 재해도 가중법, 최우법과 적률법을 선택하였다. 이 4가지 방법은 크게 재해도의 크기 순으로 정렬하여 보간하는 방법과 대수정규분포를 따르는 값을 산출하는 방법으로 나눌 수 있으며 본 절에서는 각각의 방법에 대하여 간략하게 설명하였다.

2.1 중요도 누적법

중요도 누적법은 재해도와 그 가중치를 재해도의 크기 순서에 따라 정렬하고 함께 정렬된 가중치를 누적하는 방법이다. 이 방법에서는 먼저, 산출된 재해도(x_i)와 각 재해도의 가중치(y_i)를 재해도(x_i)의 크기에 따라 작은 재해도에서 큰 재해도로 정렬한다. 그리고 재해도와 함께 정렬된 각 가중치(y_i)의 전체 가중치의 합에 대한 비, 즉 식 (1)과 같이 가중치 비(y'_i)를 계산하여 계산된 가중치 비(y'_i)의 누적값이 0.15, 0.50, 0.85에 해당하는 재해도(x_i)를 보간하여 백분위수로 결정한다. 본래 재해도의 가중치는 각 지진원에서 산출된 재해도의 중요도를 나타내지만 가중치 비는 지진지체

모델, 즉 전체 지진원에서 산출된 재해도에서 각 재해도의 중요도를 나타낸다.

$$y'_i = \frac{y_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \quad (1)$$

2.2 재해도 가중법

재해도 가중법은 산출된 재해도(x_i)에 각 재해도의 가중치(y_i)를 적용하여 백분위수를 산출하는 방법이다. 즉, 식 (2)와 같이 재해도에 가중치를 곱한 값(z_i)을 중요도 누적법과 마찬가지로 크기에 따라 작은 z_i 에서 큰 z_i 로 정렬하고 전체 재해도에서의 순서비가 0.15, 0.50, 0.85에 해당하는 재해도를 보간을 통하여 백분위수로 결정한다.

$$z_i = x_i \cdot y_i \quad (2)$$

중요도 누적법과 재해도 가중법은 모두 재해도의 크기에 따라 정렬한 후 백분위수를 산출한다는 공통점을 가지고 있지만 중요도 누적법에서는 재해도의 가중치가 정렬된 재해도에서의 백분위수 결정에 영향을 미치는 반면 재해도 가중법에서는 재해도를 정렬하는 시점에서부터 영향을 미친다는 차이점을 가지고 있다.

2.3 최우법

최우법은 최대우도를 이용하여 평균과 분산을 구하고 그 값이 대수정규분포를 따른다고 가정하여 백분위수를 산출하는 방법이다. 최대우도는 어떤 확률변수에서 모수(모집단의 평균과 분산)를 구하는 방법으로, 어떤 모수(θ)가 주어졌을 때 원하는 값들이 나올 확률인 우도($L(\theta)$)를 최대로 만드는 모수($\hat{\theta}$)를 선택하는 방법이다. 어떤 모수로 결정되는 확률변수 집합이 확률밀도함수나 확률질량함수가 될 때, 최대우도를 갖는 평균(λ)과 분산(ζ)은 다음의 식 (3) 및 (4)로 결정된다.

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i \quad (3)$$

$$\zeta^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - \lambda)^2 \quad (4)$$

두 식을 통하여 재해도에 로그를 취한 값의 평균과 표준

편차가 최대우도를 갖는 모수가 됨을 알 수 있다. 최우법에서는 재해도가 최대우도에 의해 산출된 평균과 분산을 따르는 대수정규분포로 가정되므로 산출된 평균이 50백분위수가 된다. 또 15와 85백분위수는 대수정규분포의 확률값으로, 재해도에 대수를 취한 값($\ln x$)은 평균(λ)과 분산(ζ)을 갖는 정규분포이므로 다음의 식 (5)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$P(a < X \leq b) = \int_a^b \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right] dx \quad (5)$$

식 (5)의 확률함수는 $\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}$ 를 S 라 하여 $dx = \zeta x ds$ 와 같이 적분하면 다음 식 (6)을 얻을 수 있다.⁽⁹⁾

$$P(a < X \leq b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{(\ln a - \lambda)/\zeta}^{(\ln b - \lambda)/\zeta} e^{-\frac{1}{2}s^2} ds = \Phi\left(\frac{\ln b - \lambda}{\zeta}\right) - \Phi\left(\frac{\ln a - \lambda}{\zeta}\right) \quad (6)$$

식 (6)과 표준정규분포표를 이용하여 $P(x \leq b)$ 가 0.15와 0.85가 되는 b 를 15와 85백분위수로 결정하게 된다.

2.4 적률법

적률법은 평균($\bar{x}$) 및 표준편차(s)와 대수정규분포와의 관계식을 이용하여 대수정규분포의 평균(λ)과 분산(ζ)을 산출하고, 최우법과 마찬가지로 확률함수와 표준정규분포표를 이용하여 백분위수를 결정하는 방법이다. 먼저 적률법에 의한 평균($\bar{x}$) 및 표준편차(s)는 다음 식 (7) 및 (8)과 같다.⁽⁹⁾

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (8)$$

산출된 평균($\bar{x}$)과 표준편차(s)는 각각 모집단의 평균(μ_X)과 표준편차(σ_X)에 해당하며 대수정규분포와 다음 식(9) 및 (10)의 관계를 갖는다.

$$\mu_X = \exp\left(\lambda + \frac{1}{2}\zeta^2\right) \quad (9)$$

$$\sigma_X^2 = \mu_X^2 (e^{\zeta^2} - 1) \quad (10)$$

식 (9)와 (10)을 통하여 대수정규분포의 평균(λ)과 분산(ζ)은 다음의 식 (11) 및 (12)로 구할 수 있다.

$$\lambda = \ln \mu - \frac{1}{2} \zeta^2 \quad (11)$$

$$\zeta^2 = \ln \left(\frac{\sigma_X^2}{\mu_X^2} + 1 \right) \quad (12)$$

산출된 대수정규분포의 평균(λ)과 분산(ζ)을 바탕으로 15와 85백분위수는 앞서 최우법과 동일하게 식 (6)을 사용하여 산출한다.

최우법과 적률법은 모두 대수정규분포의 평균(λ)과 분산(ζ)을 산출하고 확률함수를 이용하여 백분위수를 결정한다는 공통점을 가지고 있지만 평균(λ)과 분산(ζ)을 산출하는 방법에 차이가 있다. 최우법은 산출된 재해도에 직접 로그를 취해 대수정규분포의 평균(λ)과 분산(ζ)을 산출하지만 적률법은 재해도의 평균($\bar{x}$) 및 표준편차(s)를 계산하고 계산된 평균(μ_X)과 표준편차(σ_X)와 대수정규분포와의 관계식을 이용하여 대수정규분포를 따르는 평균(λ)과 분산(ζ)을 산출한다.

3. 지진원도와 입력자료의 논리수목

재해도의 백분위수를 산출하기 위하여 신울진 1, 2호기의 확률론적 지진재해도분석에 사용되었던 자료⁽⁸⁾를 이용하여 재해도를 계산하였다. 신울진 1, 2호기의 확률론적 지진재해도분석을 위해서 4팀이 최적안과 대안의 지진원도와 그 입력변수를 제시하였다. 본 연구에서는 그 중 각 팀이 제시한 최적안의 지진원도와 그 입력변수를 바탕으로 재해도를 산출하였다. 그림 1이 4개 팀의 지진지체구조도이다. 각 지진원도의 입력변수인 최소규모, 최대규모, 진원깊이, Gutenberg-Richter a-b값, 감쇄식에 대한 논리수목을 작성하고 작성된

논리수목에서 각 가지의 확률을 계산하였다. 확률론적 지진재해도분석에서는 입력변수와 함께 각 가지의 확률도 입력자료가 되어 본 연구에서 계산하는 재해도 곡선의 불확실성 범위를 결정하는 중요한 역할을 수행하였다.

4. 지진재해도 평가결과

4개 팀의 지진지체모델과 8개의 감쇄식을 바탕으로 확률론적 지진재해도 분석을 수행하였으며, 그 결과 산출된 각 팀의 전체 재해도는 그림 2와 같다. 한반도를 전체를 하나의 단일 지진원으로 가정한 A팀의 총 144가지의 지진지체모델에 대한 재해도가 산출되었고, 4개의 지진원으로 가정한 B팀의 총 256가지의 지진지체모델에 대한 재해도가 산출되었다. 또, 5개의 지진원으로 가정한 C팀의 총 936가지의 지진지체모델과 3개의 지진원으로 가정한 D팀의 총 432가지의 지진지체모델에 대한 재해도를 계산하였다. 그림 2는 각 팀이 제시한 144, 256, 936, 432 가지의 지진지체모델에 대한 재해도를 전부 도시한 그림으로, B, C, D팀이 제시한 지진지체모델에서 산출된 재해도가 넓은 범위에 걸쳐 나타나고 있다. 수치적으로 살펴보면, 0.3g를 기준으로 A팀의 지진지체모델에서 산출된 재해도는 최고 값으로 2.18×10^{-3} , 최저 값으로 5.38×10^{-8} 나타났고, B, C, D팀의 지진지체모델에서 산출된 재해도는 최고 값으로 각각 1.75×10^{-2} , 4.10×10^{-2} , 5.85×10^{-3} 을 나타냈으며 최저 값으로 모두 1.0×10^{-20} 보다 낮은 값을 나타냈다.

각 팀이 제시한 지진지체모델에서 산출된 전체 재해도는 그림 2에 나타난 것과 같이 큰 차이를 나타냈지만, 결론적으로 제시한 평균 재해도는 0.3g를 기준으로 4개 팀이 각각 2.264×10^{-5} , 1.026×10^{-4} , 1.656×10^{-4} , 1.277×10^{-5} 로 그 차이가 그림 2에서 나타내는 것만큼 크지 않았다. 지난 2009년

〈그림 1〉 각 지진지체모델에 대한 지진원도

〈그림 2〉 각 지진지체모델로 산출된 전체 재해도

서정문 등⁽⁸⁾이 수행했던 지진지체모델에 대한 민감도 분석 결과에서, 총 재해도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 부지를 포함한 지진원에 대한 재해도 라고 밝힌 바 있다. 따라서 본 연구에서는 전체 재해도와 산출된 평균 재해도와의 차이 역시 부지를 포함한 지진원에 대한 재해도 때문이라고 판단하여, 처음부터 하나의 단일 지진원으로 가정한 A 팀을 제외한 B, C, D 팀의 지진원도에서 부지를 포함한 지진원에 대한 재해도를 산출하였다.

산출된 각 팀의 전체 재해도는 그림 3과 같다. 각 재해도 그림은 B팀의 지진원 4에서 제시한 총 64가지의 지진지체 모델에 대한 재해도와 C팀의 지진원 5에서 제시한 총 216가지의 지진지체모델에 대한 재해도, D팀의 지진원 3의 총 144가지의 지진지체모델에 대한 D팀의 재해도를 나타내고 있다. 지진원에서 산출된 전체 재해도는 그림 3에서 보는 바와 같이 확연한 범위 차이를 나타내지만 각 팀의 평균 재해도는 0.3g를 기준으로 각각 2.264×10^{-5} , 1.026×10^{-4} , 1.655×10^{-4} , 8.630×10^{-6} 으로 2개의 지진원이 부지와 인접하게 나타났던 D팀의 재해도가 약 30%감소하였지만 전반적으로 그 차이가 크지 않았다.

이를 통해 재해도 분석 시에 부지를 포함한 지진원에 대한 재해도가 큰 영향을 나타내고 있음 다시 확인 할 수 있었다.

5. 재해도의 백분위수 비교

각 백분위수 산출방법으로 계산된 15, 50(median), 85백분위수는 표 1과 그림 4~7과 같다. 각 그림과 표에서 WA

〈그림 3〉 각 지진지체모델의 지진원 중 부지를 포함한 지진원에서 산출된 전체 재해도

는 중요도 누적법, WH는 재해도 가중법, ML은 최우법, MO는 적률법을 나타낸다. 표 1에서 B 팀과 C 팀의 15백분위수에 대한 0인 값은 1.0×10^{-20} 보다 작은 값을 나타낸 재해도로, 사용한 재해도 프로그램의 특성상 1.0×10^{-20} 보다 작은 재해도는 0으로 계산된다. 산출된 백분위수의 차이를 수치적으로 살펴보면, 0.3g를 기준으로 A 팀의 경우 15백분위수와 85백분위수의 차이가 통계처리 방법에 따라 약 9.2~1699.4배의 차이를 나타냈다. 반면, B, C, D 팀의 15백분위수와 85백분위수 사이의 차이는 15백분위수가 0인 값을 1.0×10^{-20} 으로 가정했을 때 약 $13.8 \sim 3.2 \times 10^{16}$ 배의 큰 차이를 보였으며 중요도 누적법, 재해도 가중법, 최우법으로 산출된 15백분위수가 그림 4~7에 나타난 것과 같이 1.0×10^{-20} 안팎의 매우 작은 값을 나타냈다. 또, 전반적으로 동일한 재해도에 대하여 중요도 누적법, 재해도 가중법, 최우법으로 계산된 백분위수 사이의 각 방법에 대한 차이가 작게 나타났으며 그림 2와 비교해 봤을 때 산출된 전체 재해도의 범위를 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다. 적률법으로 계산된 백분위수는 다른 방법으로 산출된 백분위수와 전반적으로 다소 큰 차이를 나타냈지만 백분위수 간의 편차는 작게 나타났다.

재해도 분석 결과에 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀진 부지를 포함한 지진원에 대한 재해도의 백분위수는 표 2와 그림 8~10과 같다. 백분위수 그림은 앞서 그림 4~7과 마찬가지로 각 팀의 지진원에서 산출된 재해도의 백분위수가 산출 방법에 따라 나타나있다. 표 2는 0.3g를 기준으로 한 부지를 포함한 지진원에 대한 재해도의 백분위수로 표 1과 비교했

〈표 1〉 각 지진지체모델로 산출된 재해도의 0.3g에 대한 백분위수

Method	A team			B team		
	15 Percentile	Median	85 Percentile	15 Percentile	Median	85 Percentile
WA	2.733×10^{-6}	1.177×10^{-5}	4.139×10^{-5}	0.000	7.571×10^{-14}	5.714×10^{-5}
WH	2.971×10^{-8}	9.680×10^{-6}	5.049×10^{-5}	0.000	2.415×10^{-14}	1.944×10^{-4}
ML	9.686×10^{-8}	2.525×10^{-6}	6.580×10^{-5}	5.214×10^{-20}	1.946×10^{-13}	7.261×10^{-7}
MO	4.204×10^{-6}	1.274×10^{-5}	3.858×10^{-5}	8.222×10^{-6}	3.641×10^{-5}	1.612×10^{-4}
Method	C team			D team		
	15 Percentile	Median	85 Percentile	15 Percentile	Median	85 Percentile
WA	0.000	1.536×10^{-13}	7.668×10^{-5}	1.429×10^{-13}	6.995×10^{-7}	8.056×10^{-6}
WH	0.000	8.133×10^{-12}	3.203×10^{-4}	1.668×10^{-14}	3.280×10^{-6}	2.381×10^{-5}
ML	1.678×10^{-18}	3.662×10^{-12}	7.994×10^{-6}	5.157×10^{-14}	5.715×10^{-9}	6.333×10^{-4}
MO	1.216×10^{-5}	5.584×10^{-5}	2.563×10^{-4}	1.533×10^{-6}	5.699×10^{-6}	2.118×10^{-5}

〈그림 4〉 A팀의 지진지체모델로 산출된 재해도의 백분위수

〈그림 5〉 B팀의 지진지체모델로 산출된 재해도의 백분위수

〈그림 6〉 C팀의 지진지체모델로 산출된 재해도의 백분위수

〈그림 7〉 D팀의 지진지체모델로 산출된 재해도의 백분위수

을 때 15와 50백분위수에서 확연한 차이를 나타내고 있다. 15와 85백분위수 사이의 차이가 약 4.5-13.5배의 차이로 크게 줄어들었으며 동일한 재해도에서 산출된 백분위수들의 산출방법에 따른 편차도 줄어들었다. 그림 4~7은 전반적으로 중요도 누적법, 재해도 가중법, 최우법으로 산출된 백분위수의 경향이 유사하게 나타났으며, 적률법으로 산출된 백분위수가 백분위수 범위는 좁았지만 다른 방법과는 다른 경향을 나타냈다. 하지만 그림 8~10은 4가지 방법으로 산출된 백분위수의 결과가 모두 유사하게 나타났다.

다시 한번 각각의 백분위수 산출방법을 살펴보면, 중요도 누적법으로 산출된 백분위수는 그림 2, 3에 나타난 전체 재해도의 범위를 포괄하고 있으며 그림 5~7에서 평균 재해도보다 85백분위수가 더 작게 나타나는 것과 같이 작은 재해도에서 큰 재해도로의 증가와 전체에서의 가중치를 뚜렷이

볼 수 있다는 장점을 가지고 있다. 재해도 가중법은 산출된 재해도에 가중치를 반영하여 역시 전체 재해도의 범위를 효과적으로 반영하고 있으며 산출된 재해도에 가중치가 직접적으로 영향을 줌으로써 가중치가 높은 재해도의 특성을 나타낼 수 있다. 최우법으로 산출된 백분위수는 재해도에 대수를 취해 대수정규분포의 평균과 분산을 산출하기 때문에 전체 재해도의 특성을 반영할 수 있으면서 대수정규분포에 의한 백분위수간의 편차가 일정하다. 그래서 그림 5와 그림 6에서와 같이 85백분위수가 50백분위수에 맞춰 평균 재해도보다 낮은 값을 취하게 되며, 재해도에 대수를 취하는 특성 때문에 산출된 재해도가 1.0×10^{-20} 보다 작아 0으로 표기된 재해도의 경우 그 값을 다시 1.0×10^{-20} 으로 가정하기 때문에 그림 7과 같이 0.1g 이하에서 85백분위수의 형태가 다소 어색하게 나타날 수 있다. 적률법은 재해도의 평균과 표

〈표 2〉 각 지진지체모델의 지진원 중 부지를 포함한 지진원으로 산출된 재해도의 0.3g에 대한 백분위수

Method	A_source			B_source		
	15 Percentile	Median	85 Percentile	15 Percentile	Median	85 Percentile
WA	2.733×10^{-6}	1.177×10^{-5}	4.139×10^{-5}	4.021×10^{-5}	6.928×10^{-5}	1.802×10^{-4}
WH	2.971×10^{-8}	9.680×10^{-6}	5.049×10^{-5}	1.787×10^{-5}	6.490×10^{-5}	1.991×10^{-4}
ML	9.686×10^{-8}	2.525×10^{-6}	6.580×10^{-5}	2.330×10^{-5}	6.515×10^{-5}	1.822×10^{-4}
MO	4.204×10^{-6}	1.274×10^{-5}	3.858×10^{-5}	3.078×10^{-5}	7.265×10^{-5}	1.715×10^{-4}
Method	C_source			D_source		
	15 Percentile	Median	85 Percentile	15 Percentile	Median	85 Percentile
WA	5.118×10^{-5}	1.182×10^{-4}	2.712×10^{-4}	1.666×10^{-6}	5.130×10^{-6}	1.692×10^{-5}
WH	4.106×10^{-5}	1.092×10^{-4}	3.043×10^{-4}	1.171×10^{-6}	3.967×10^{-6}	1.562×10^{-5}
ML	4.267×10^{-5}	1.098×10^{-4}	2.826×10^{-4}	1.127×10^{-6}	4.147×10^{-6}	1.526×10^{-5}
MO	4.856×10^{-5}	1.160×10^{-4}	2.773×10^{-4}	1.759×10^{-6}	5.089×10^{-6}	1.472×10^{-5}

〈그림 8〉 B팀의 지진지체모델의 지진원 중 부지를 포함한 지진원으로 산출된 재해도의 백분위수

〈그림 9〉 C팀의 지진지체모델의 지진원 중 부지를 포함한 지진원으로 산출된 재해도의 백분위수

〈그림 10〉 D팀의 지진지체모델의 지진원 중 부지를 포함한 지진원으로 산출된 재해도의 백분위수

준편차를 바탕으로 대수정규분포의 평균과 분산을 계산하기 때문에 전체 재해도의 특성이 효과적으로 반영되지는 못하지만 재해도의 평균을 잘 반영할 수 있고 대수정규분포에 의해 산출된 백분위수간의 편차가 일정하게 나타난다.

앞서 재해도 결과에서는 전체 지진원에 대한 재해도의 범위와 부지를 포함한 지진원에 대한 재해도의 범위는 매우 다르게 나타났지만 전체 지진원에 대한 평균 재해도와 부지를 포함한 지진원에 대한 평균 재해도는 거의 동일하게 나타났다. 이를 통해 지진재해도 분석 결과 얻어지는 평균 재해도는 재해도의 전체 범위보다 부지를 포함한 지진원에 대한 영향이 큼을 알 수 있었으며, 그림 5, 6, 7과 그림 8, 9, 10의 비교를 통하여 부지를 포함한 지진원에 대한 백분위수는 산출방법에 따른 차이가 작게 나타남을 알 수 있었다. 또, 중요도 누적법, 재해도 가중법, 최우법은 그림 2, 3을 바탕으로 그림 4~10에 나타난 것과 같이 산출된 전체 재해도의 범위에 따라 그 범위가 크게 달라졌으며 이를 통해 3가지 방법이 산출된 전체 재해도의 범위에 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 적률법으로 산출된 백분위수는 중요도 누적법, 재해도 가중법, 최우법과 달리 전체 재해도의 범위에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며 전반적으로 백분위수 범위가 좁게 나타났다. 그러나 부지를 포함한 재해도에 대한 백분위수는 4가지 방법에 대한 결과가 거의 유사하게 나타남에 따라 적률법으로 산출된 백분위수가 평균 재해도에 큰 영향을 미치는 부지를 포함한 지진원에 대한 재해도를 효과적으로 고려하고 있다고 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 확률론적 지진재해도분석 결과를 나타내는 재해도의 백분위수 산출방법을 비교하였다. 이를 위하여 백분위수 산출방법으로 중요도 누적법, 재해도 가중법, 최우법, 적률법을 조사하여 신울진 1, 2호기 지진재해도분석에 사용되었던 4개 팀의 최적 지진원도와 입력변수로 계산된 재해도의 백분위수를 산출하였다.

백분위수 산출방법이 지진재해도 곡선을 결정하는데 미치는 영향을 비교한 결과, 중요도 누적법으로 산출된 백분위수는 계산된 전체 재해도의 특성이 그대로 나타난다는 장점을 가지고 있으며 재해도 가중법으로 산출된 백분위수는 재해도와 가중치가 결합된 효과를 볼 수 있었다. 또, 최우법과 적률법으로 산출된 백분위수는 대수정규분포를 따르기 때문에 불확실성 범위가 일정하고 최우법은 재해도에서 바로 대수정규분포의 평균과 분산을 계산하기 때문에 재해도의 분포 특성을 반영할 수 있고 적률법은 불확실성 범위가 좁게 나타난다는 장점을 가지고 있다.

4가지 방법으로 재해도의 백분위수를 산출해 본 결과, 전반적으로 중요도 누적법, 재해도 가중법, 최우법으로 산출된 백분위수가 유사한 경향을 나타냈으며 산출된 전체 재해도의 범위를 잘 반영하고 있었다. 적률법으로 산출된 백분위수는 평균 재해도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 부지를 포함한 지진원에 대한 재해도의 범위를 잘 반영하고 있음을 부지를 포함한 지진원의 재해도에 대한 백분위수 산출방법에 따른 결과로 확인할 수 있었다. 여러 백분위수 산출방법을 바탕으로 계산된 백분위수를 비교해 본 결과, 적률법을 이용하여 재해도의 백분위수를 산출하는 것이 재해도의 불확실성 범위가 좁게 나타나면서 총 재해도에 가장 큰 영향을 미치는 부지를 포함한 지진원에 대한 재해도를 충분히 고려할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 지진재해도의 백분위수를 적률법으로 산출하는 것이 중요도 누적법과 재해도 가중법, 최우법보다 더 효과적이라고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진사업개발(CATER 2009-5208)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 이종립, 장천중, 신진수, 연관희, 정의호, “지진재해도 평가의

- 불확실성 개선에 관한 연구,” TR.96NJ21.J1999.72, 한국전력공사 전력연구원, 대전, 1999.
2. US NRC Regulatory Guide 1.60, *Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants*, 1973.
 3. US NRC Regulatory Guide 1.208, A Performance-based Approach to Define the Site-specific Earthquake Ground Motion, 2007.
 4. US NRC Regulatory Guide 1.65, Identification and Characterization of Seismic Source and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion, 1997.
 5. 지진공학회, 내진설계기준연구 II, 한국건설기술연구원, 고양시, 257-415, 1997.
 6. 서정문, 이현미, 최인길, “한반도의 최적 지진원 변수 b 값 및 그이 적용에 관한 연구,” 한국지진공학회, 제14권, 제1호, 35-42, 2010.
 7. 平野 光將, 高田 毅士, 能島 暢呂, 山口 彰, 中村 晉, 村松 建, 越塚 誠一, 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準, AESJ-SC-P00X:200X, 社団法人 日本原子力学会, 日本, 2006.
 8. 서정문, 이현미, 최인길, 김민규, “원전부지 확률론적 지진재해도분석 입력변수의 민감도분석,” KAERI/TR-3931/2009, 한국원자력연구원, 대전, 2009.
 9. Ang, A. H., and Tang, W. H., “Probability Concepts in Engineering Emphasis on Application to Civil and Environmental Engineering 2nd ed.,” John Wiley & Sons, inc., Hoboken, 96-255, 2007.