

지진의 이중산입에 대한 소고(小考)

A Note on the Earthquake Double Counting

노명현^{1)*}

Noh, Myunghyun^{1)*}

¹⁾한국원자력안전기술원 구조부지평가실 책임연구원

¹⁾Principal Research Scientist, Department of Structural Systems & Site Safety Evaluation, Korea Institute of Nuclear Safety

/ A B S T R A C T /

As a result of active geological investigation of faults in Korea, many Quaternary faults have been identified and some of them were judged to have potential to generate earthquakes. Those faults need to be considered as additional seismic sources in the seismic hazard analysis. When a fault is introduced as a new source, the earthquakes generated by the fault should be removed from the area sources that include any part of the fault, to avoid double counting. In practice, however, double counting cannot completely be avoided as the complete separation of the fault-generated earthquakes from the area sources is impossible due to uncertainties related to the earthquake location, subsurface structures of faults, etc. When a new fault source is introduced, the only constraint is the invariance of earthquake frequency. The maximum earthquake and the Richter-b value should also be subject to change, but there are no competent approaches to estimate the change due to incomplete separation of earthquakes. To gain insight into the effect of a new fault source, an example calculation of the seismic hazard were carried out. The example calculation shows that addition of a new fault source centers seismic hazard around the fault source.

Key words: New fault source, Double counting of earthquakes, Seismic hazard

1. 서론

2016년 9월 12일에 발생한 경주지진($M_L=5.8$)과 이듬해 11월 15일에 발생한 포항지진($M_L=5.4$)은 상당한 피해를 유발하였으며 그로 인해 지진 안전성에 대한 국가적 관심을 촉발하였다. 그 결과 행정안전부 주관으로 2017년부터 2036년까지 20년에 걸쳐 총 4단계의 ‘한반도 단층구조선의 조사 및 평가기술 개발’ 과제가 시행되었으며, 2022년에 1단계(2017년-2021년) 보고서가 공개되었다[1]. 이 보고서에 기재된 제4기 단층 중 일부는 관련 규정에서 정의한 지진원에 해당하므로(예를 들면, 원자력안전위원회[2]), 지진재해도 평가에 지진원으로 고려되어야 한다. 2016년 경주지진과 2017년 포항지진을 발생시킨 지하단층 역시 지진원 단층으로 고려되어야 한다.

지진재해도 평가에 사용되는 지진원은 기본적으로 단층지진원(Fault Source)과 면적지진원(Area Source)의 2가지 형태가 있다. 단층지진원은 지진을 발생시킬 수 있는 단층을 말한다. 한편, 지진이 산발적으로 발생하

나 이들 지진을 발생시킨 단층이 명확하게 확인되지 않는 경우, 이 지역을 하나의 지진구역으로 정의할 수 있는데 이를 면적지진원이라 한다. 즉, 면적지진원은(알려진) 단층지진원에 속하지 않는 나머지 지진을 포함하는 구역이다. 구역별로 지진 발생특성의 차이를 보이는 경우 다수의 면적지진원을 정의하는 것이 일반적이나, 면적지진원들의 지진활동도가 대체적으로 유사해서 지진재해도에 유의미한 차이가 없는 경우에는 전체 면적지진원을 통합하여 하나의 배경지진원(Background Source)으로 대체하기도 한다. 배경지진원도 일종의 면적지진원으로 간주할 수 있으므로, 이하 내용에서는 지진원을 면적지진원과 단층지진원으로 표기하겠다.

단층지진원은 공간적으로 하나 또는 그 이상의 면적지진원과 중첩된다. 따라서 면적지진원의 지진특성을 평가하려면, 해당 면적지진원 내에서 발생한 지진 중 단층지진원과 연관된 지진을 제거한 후 나머지 지진만을 이용해야 한다. 그러지 않을 경우, 단층지진원 지진들이 면적지진원에도 포함되어 소위 지진의 이중산입(Earthquake Double Counting) 문제가 발생한다. 이중산입을 허용하면, 단층지진원이 추가될 때마다 지진재해도가 증가하는 비정상적인 결과를 초래하므로, 새로운 단층지진원이 추가될 때마다 이 단층의 일부라도 포함하는 모든 면적지진원의 지진발생특성을 재평가해야 한다.

우리나라에서 경주지진 지진원단층, 포항지진 지진원단층, 그리고 지표

*Corresponding author: Noh, Myunghyun

E-mail: mhnoh@kins.re.kr

(Received March 6, 2023; Revised April 4, 2023; Accepted April 4, 2023)

지질 조사를 통해 확인된 제4기 단층[1] 등 새로운 단층지진원이 확인되는 상황에서 지진의 이중산입에 대한 논의는 매우 시의적절하다 할 수 있다. 본 소고에서는 단층지진원의 추가에 따른 면적지진원의 지진발생특성 재평가에서 현실적으로 당면한 한계를 살펴보고, 이러한 한계를 감안하여 적용할 수 있는 원칙을 구체적으로 제시하였다. 또한, 새로운 단층지진원이 추가되는 경우 지진재해도의 변화 양상을 보기 위해, 간단한 지진원도(Seismic Map)를 설정하여 단층지진원 도입 전후의 지진재해도 변화를 계산하여 제시하였다.

2. 현실적 한계와 유효한 원칙

2.1 현실적 한계

전술한 바와 같이, 새로운 단층지진원이 추가되면 이 단층지진원뿐만 아니라 이 단층지진원을 일부라도 포함하는 (기존) 면적지진원의 지진발생특성을 재평가해야 한다. 지진원의 지진발생특성에는 지진재해도 계산 모델에 따라 다양한 인자가 포함되지만, 새로운 단층지진원의 도입에 따른 재평가 측면에서 중요한 인자로서 지진발생률, 최대지진, Richter-b 값을 들 수 있다. 이중산입의 방지와 관련하여 현재의 지질 및 지진학적 여건을 고려할 때, 이들 3가지 인자의 재평가에 현실적으로 어떤 한계가 있는지 분석하는 것은 지진재해도 분석에 큰 도움이 된다.

신규 단층지진원과 이를 일부라도 포함하는 면적지진원의 지진발생특성을 재평가하려면 먼저 신규 단층지진원에서 발생한 지진과 기존의 면적지진원에서 발생한 지진을 구별해야 한다. 그러나 지진의 위치, 단층의 지하구조 등에 수반된 불확실성 때문에 이들 지진원에서 발생한 모든 지진을 완전하게 구별하는 것은 현실적으로 불가능하다. 특히, 지진 위치의 불확실성은 과거로 갈수록, 지진의 규모가 작을수록 크다. 이러한 어려움으로 인해 실제 지진재해도 평가에서는 특정 규모(예를 들면 M=6.5) 이상의 지진이 모두 단층지진원에서 발생한 것으로 가정하고, 나머지 지진이 면적지진원에서 발생한 것으로 가정하기도 한다[3-6]. 만일 부지의 지진재해도가 주로 단층지진원에서 발생하는 대규모 지진에 의해 결정된다면 이러한 방법은 실질적으로 유효하다. 그러나 순수하게 지진학적 측면에서 볼 때, 단층지진원에서도 작은 지진이 발생하므로 (오히려 큰 지진보다 더 많이 발생한다) 이러한 가정은 옳지 않다. 특히, 우리나라와 같은 중약진 지역(Low-to-Intermediate Seismicity Region)에서는 지진재해도가 M=6.5 이하의 중규모 지진에 의해 결정되므로 위와 같은 가정의 적용은 무리가 있다.

또 다른 형태의, 더욱 심각한 현실적 한계는 제4기 단층에서 비롯된다. 우리나라의 제4기 단층은 지표지질조사를 통해 확인·평가되었으며[1], 과거에 발생한 지진 중 이들 제4기 단층과 연관된 것으로 확인된 지진은 없다. 그러므로 제4기 단층의 지진발생률, 최대지진, Richter-b 값의 추정은 단층의 길이, 총 변위 및 변위 이력 등 한정된 지질학적 조사 자료에 전적으로 의존한다. 개별 단층마다 다소 차이는 있겠지만, 전반적으로 가용한 지질학적 조사 자료는 제한적일 뿐만 아니라 큰 불확실성을 수반하고 있다. 따라서 이로부터 추정된 지진발생특성에도 큰 불확실성을 수반할 것이 자명하기 때문에, 단층지진원으로서 제4기 단층의 지진발생특성 도출에는 각별한 주의가 요망된다.

2.2 유효한 원칙

새로운 지진원단층의 발견과 관련하여, 지진의 발생빈도에 대해 아래와 같은 공리적 명제(Axiomatic Proposition)가 성립한다.

「단층은 발견되기 전에도 거기에 존재했다. 그러므로 그 단층이 발견되었다고 과거 지진발생이력이 변하지 않는다.」

위 공리적 명제가 의미하는 바는, 새로운 단층지진원을 도입해도 이 단층지진원 및 이를 포함하는 면적지진원에서 발생한 지진발생빈도의 총합은 변하지 않는다는 것이다. 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\sum_{i=1}^{N_0} \nu_i^b = \sum_{j=1}^{N_1} \nu_j^b \quad (1)$$

여기서, N_0 와 ν_i^b 는 각각 단층지진원 도입 전 면적지진원의 개수와 i 번째 지진원의 지진발생빈도이며, N_1 와 ν_j^b 는 각각 단층지진원 도입 후 지진원의 개수와 j 번째 지진원의 지진발생빈도이다. 단층지진원을 일부라도 포함하는 면적지진원만이 식(1)에 포함되며, 이들 면적지진원의 지진발생특성을 제외한 나머지 특성은 단층지진원 포함 전과 후에 동일한 것으로 가정한다. 한편 식(1)은, 지진발생률이 충분히 긴 기간의 지진관측 자료로부터 안정적으로 추정된 경우를 가정한다.

식(1)이 잘 이행된 사례로 Rivas-Medina et al.[7]을 들 수 있다. Rivas-Medina et al.은 단층의 이동률을 이용하여 단층지진원의 지진발생률을 계산한 후, 기존 면적지진원의 지진발생률에서 이 값을 제한 나머지 값을 단층지진원이 도입된 후 면적지진원의 지진발생률로 설정하였다. 여기서 주목할 점은, 2.1 절의 예시[3-6]처럼 지진목록 상의 개별 지진을 확인하여 제한 것이 아니라 지진발생률을 제했다는 것이다.

단층의 이동률(Slip Rate)로부터 지진발생빈도를 추정할 수 있다[8, 9]. 단층의 이동률로부터 추정한 지진발생빈도는 지진목록에 종속되지 않은 독립적인 정보이다. 단층의 이동률은 GPS 등을 이용한 측지자료(Geodetic Data)와 야외조사를 통해 획득한 고지진학적 자료(Paleo-seismic Data)로부터 계산할 수 있다.

측지자료로부터 단층의 이동률을 계산할 때는, 관측된 변위 모두가 지진을 발생시키는 것이 아니라 변위의 상당 부분이 지각 변형의 형태로 변환된다는 것을 고려해야 한다[10, 11]. 예를 들어, Ghione[12]는 GPS로 관측한 변위율의 40%만을 단층의 이동률로 간주하였다. 환경계부에 위치한 일본이나 미국 서부 해안지역과 같이 현생 지각운동이 활발하게 진행되는 지역에서는 측지학적 방법을 이용하여 계산한 단층의 이동률의 신뢰도가 비교적 높다. 그러나 우리나라와 같은 판내부 지역에서는 이동률이 너무 작아 측정값의 신뢰도를 담보하기 어렵다.

고지진학적 자료를 이용할 경우, 이동률은 단층 변위의 합을 발생 기간으로 나눈 값이다. 변위합은 절대변위합(Sum of Absolute Displacement)과 순변위합(Net Sum of Displacement)으로 구분할 수 있는데, 절대변위합은 단층운동 때마다 발생하는 단층 변위의 절대값의 합이며 순변위합은 단층변위의 벡터 합이다. 단층 변위의 방향은 단층운동 때마다 항상 동일한

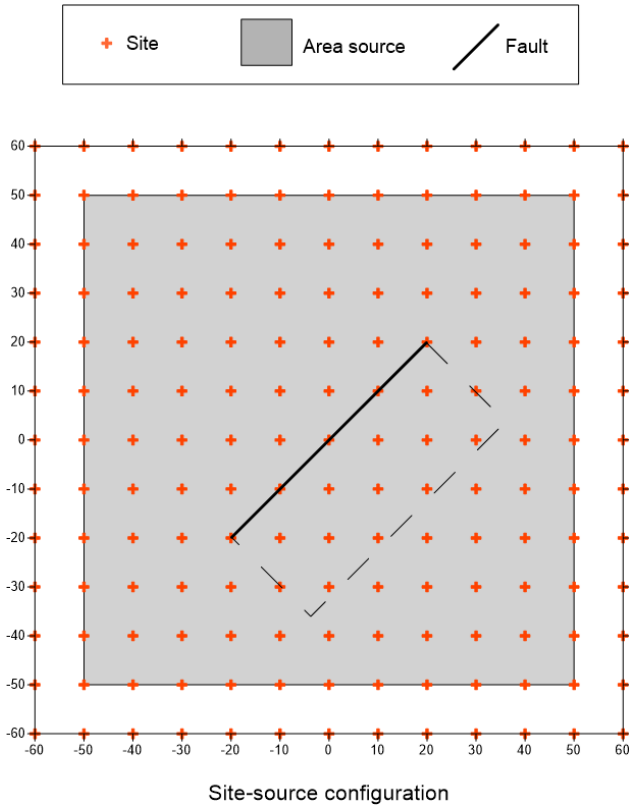


Fig. 1. Configuration of sources and sites

것이 아니므로, 순변위합은 절대변위합보다 작다. 지표지질조사에서 추정할 수 있는 변위합은 순변위합에 해당한다. 또한 단층의 변위는 단층의 중심부에서 가장 크고, 양 끝으로 갈수록 작아지는 경향을 보이므로[13], 총변위는 실제보다 작게 추정되는 경향이 있다. 단층의 이동기간은 총변위에 산입한 단층운동의 처음과 마지막 시기를 포함하는 기간이다. 마지막 단층운동의 시기는 비교적 측정이 용이하나 처음 단층운동 시기의 측정은 매우 어렵다. 이는 이전에 발생한 단층변위 위에 후속 단층변위가 중첩되어 최초 단층운동 변위의 흔적을 특정하기 어렵기 때문이다. 그 결과 단층의 이동기간은 실제보다 작게 측정되는 경향이 있다.

여러 가지 이유로 단층의 이동률이 과대평가되어 이로부터 추정된 지진 발생빈도가 단층지진원 도입 전 전체 면적지진원의 지진발생빈도를 초과하는 경우도 발생할 수 있다. 이는 식(1)에 위배되므로 단층 이동률을 재검토하여 합리적으로 조정되어야 한다. 지진발생빈도의 추정 방법에 관계없이 식(1)이 성립하여야 하므로, 기존 면적지진원의 지진발생빈도는 새로운 단층지진원의 지진발생빈도 만큼 감소해야 한다[7].

일반적으로 과거에 발생한 큰 규모의 지진 중 상당수가 새로운 단층지진원에서 발생한 것으로 판명됨에 따라 이들 지진은 기존의 면적지진원 지진에서 제외된다. 면적지진원의 최대지진은 해당 면적지진원에서 발생한 지

진목록으로부터 추정된다[14-16]. 최대지진의 추정은 지진목록에 포함된 큰 지진에 민감하다. 따라서 큰 지진이 제거된 면적지진원의 최대지진 추정치는 감소하게 된다. 반면, 단층지진원의 최대지진은 통상적으로 단층의 파열면(면적, 길이, 또는 폭)로부터 추정된다[17-21]. 전체 단층면이 파열될 때 파열면의 크기가 최대이므로, 이때의 파열면에 상응하는 규모가 이 단층에서 발생할 수 있는 최대지진의 규모이다. 그러므로 이중산입의 회피는 면적지진원의 최대지진 추정에만 영향을 준다.

Richter-b 값은 지진목록으로부터 추정한다[16, 22]. 최대지진과 달리, Richter-b 값은 작은 지진의 분포에도 영향을 받는다. 지진의 규모가 작을수록 지진의 위치에 수반된 불확실성이 커져, 작은 지진까지 완전하게 분리하는 것은 현실적으로 불가능하다. 즉, 이중산입의 회피가 어느 정도 성공적으로 이루어졌다 하더라도 작은 지진까지 완전히 분리된 것이 아니므로 면적지진원의 Richter-b 값이 올바르게 추정된다는 보장이 없다. 한편, 지진발생률이나 최대지진과 달리 Richter-b 값은 지진원별 변화가 크지 않다. 그러므로 신뢰할 만한 Richter-b 값 추정이 어렵다면 단층지진원과 면적지진원 구분 없이 통합된 지진목록으로부터 추정한 Richter-b 값을 사용해도 무리가 없을 것으로 생각된다.

3. 예제 계산

새로운 단층지진원의 도입에 따른 지진재해도의 변화를 구체적으로 살펴보기 위해 Fig. 1과 같은 지진원 및 부지의 배치를 구성하였다. Fig. 1에서, 기호 ‘+’는 지진재해도가 계산될 부지의 위치를 나타내며, 음영이 있는 사각형은 면적지진원을, 그리고 굵은 실선은 단층의 상단을 나타낸다. 면적지진원의 진원깊이는 지하 5-20 km에 균질하게 분포(Uniform Distribution)하는 것으로 가정하였다. 그림의 위쪽을 북쪽이라 하면, 단층은 45°SE의 경사를 가지며 지하 5-20 km 깊이에 걸친 직사각형 모양의 단층면을 갖는다. 이 단층면을 지표에 투영한 형상을 점선으로 나타내었다. 단층면 상에서 발생하는 파열면의 수직 및 수평 위치는 균질분포를 따르는 것으로 가정하였다. 규모분포는 이중절단지수함수(Doubly-truncated exponential Function)를 가정하였으며, Sadigh et al.[23]의 지진동 감쇄식의 평균값을 적용하였다. 공간좌표의 단위는 km이다.

면적지진원과 단층지진원의 지진특성을 Table 1에 기술하였다. 첫 번째 열의 ‘Before’는 단층지진원이 반영되기 전의 지진원 모델을 나타내며 그 밑의 ‘After’는 단층지진원이 반영된 후의 지진원 모델을 나타낸다. 단층지진원이 도입된 후 지진원 모델은 면적지진원과 단층지진원으로 구성된다. 단층지진원이 반영되기 전의 지진원 모델은 하나의 면적지진원으로 구성되었으므로 모든 지진이 면적지진원에서 발생한 것으로 간주되었다. 따라서 단층지진원이 도입되기 전에는 최소지진 $m_{min}=5$ 이상 지진의 연간 발생빈도($\nu_{m \geq 5}$) 8.0E-2가 모두 하나의 면적지진원에 할당되었다. 단층지진

Table 1. Seismic characteristics of sources

Identification of fault	Source	m_{min}	m_{max}	$\nu_{m \geq 5}$	Richter-b	Depth	Dip
Before	Area	5.0	7.5	8.0E-2	1.0	5-20 km	-
	Area	5.0	6.0	3.0E-2	1.0	5-20 km	-
After	Fault	5.0	7.5	5.0E-2	1.0	5-20 km	45°SE

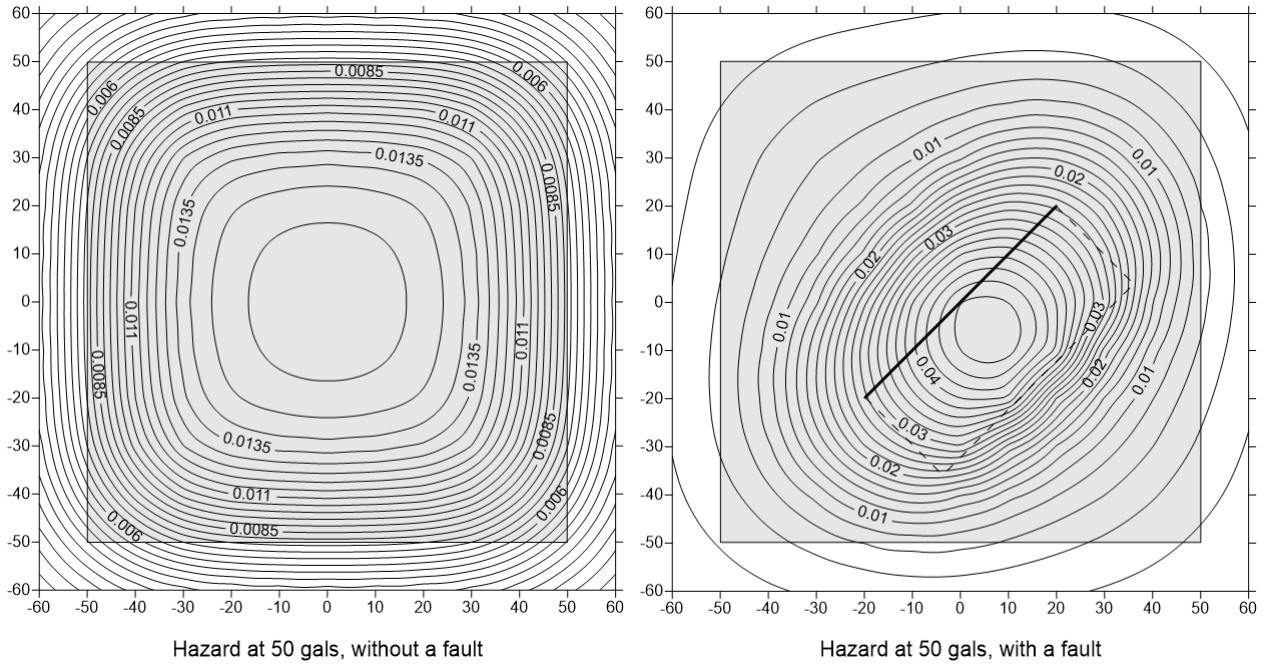


Fig. 2. Spatial distribution of hazard at 50 gals

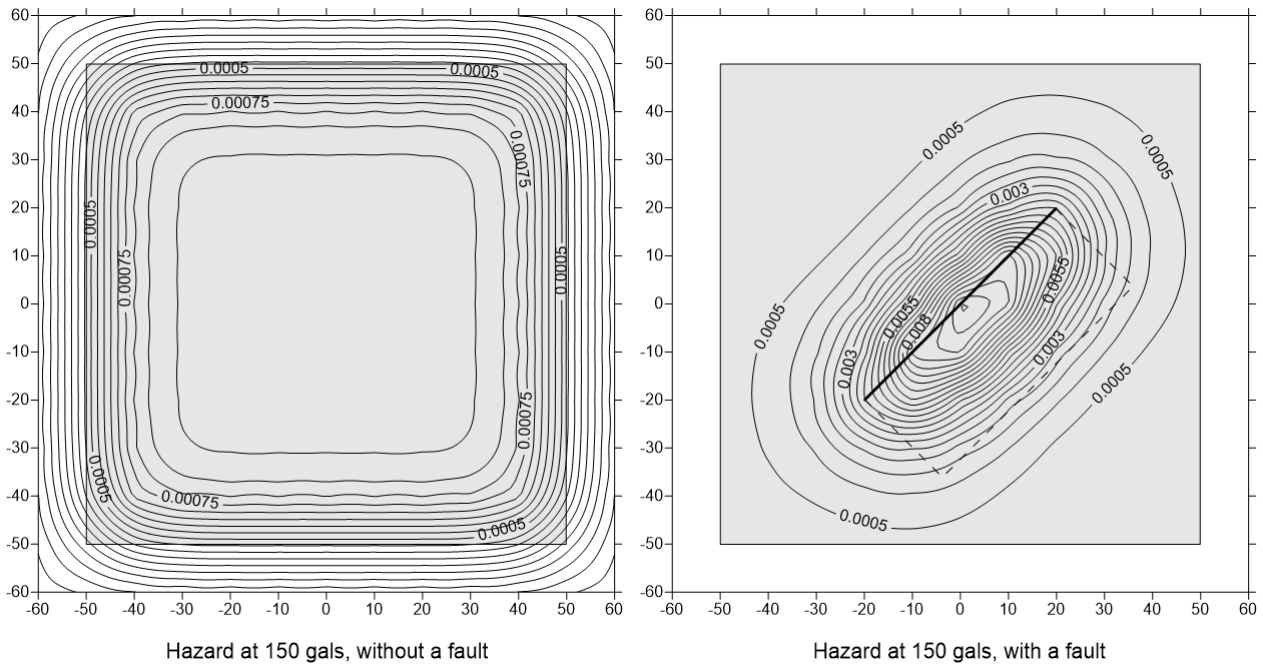


Fig. 3. Spatial distribution of hazard at 150 gals

원 도입 후에는 면적지진원에 3.0E-2, 단층지진원에 5.0E-2가 할당되었다. 단층지진원이 반영되기 전, 면적지진원의 최대지진(m_{max})은 단층지진원의 최대지진과 같이 규모 7.5이었으나, 단층지진원이 반영된 후에는 큰 지진이 단층지진원에서 발생한 것으로 가정하여 규모 6.0으로 감소하였다. 두 지진원 모두 우세 운동감각(Slip Sense)은 주향이동(Strike Slip)으로 가정하였다.

이상의 지진재해도 입력정보를 이용하여 총 169개 부지에서 지진재해도를 계산하였다. 지진재해도로는 50 gal부터 500 gal까지 50 gal 간격으로 계산하였다. Fig. 2에 50 gal에 대한 지진재해도의 공간적 분포를 나타내었다.

Fig. 2의 왼쪽 그림은 단층지진원을 도입하기 전 지진재해도의 분포를 나타내며, 오른쪽 그림은 단층지진원을 도입한 후 지진재해도의 분포를 나타낸다. 단층지진원을 도입한 후, 지진재해도가 단층지진원을 중심으로 재배치된 것을 알 수 있다. 단층지진원 도입 전에는, 지진재해도가 가장 큰 지점이 중앙에 위치했으나 단층지진원 도입 후에는 단층면의 경사를 따라 남동쪽으로 이동했다. 즉, 단층의 지진재해도가 단층 하반에서 보다 상반에서 더 높게 나타나는데, 이는 지진재해도 분석에서 알려진 바와 일치한다[8, 9], [12].

지진재해도가 단층지진원을 중심으로 재배치되는 현상은 지진동 수준이 증가함에 따라 더욱 명확하게 나타난다. Fig. 3은 150 gal에 대한 지진재

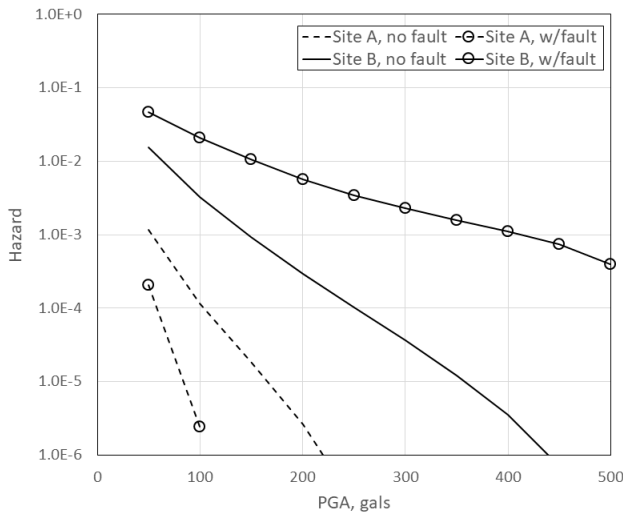


Fig. 4. Hazard change before and after introduction of a fault source

해도의 공간적 분포를 나타낸다. 50 gal에 대한 지진재해도와 비교할 때, 150 gal에 대한 지진재해도는 단층지진원을 중심으로 더욱 밀집되었다. 또한 큰 값의 지진재해도가 단층의 상단, 즉 지표에 가까운 곳에 집중되어 나타난 것을 알 수 있다.

이러한 지진재해도 분포의 변화를 더 명확하게 살펴보기 위해 2개 부지를 선정하여 지진재해도 곡선을 비교하였다. Fig. 4에서 Site A는 단층에서 가장 먼 지점으로서 좌표 (-60,60)에 위치하며, Site B는 단층 상단의 중심으로서 좌표 (0,0)에 위치한다(Fig. 1 참조). Fig. 4에서 점선으로 나타낸, 아래 두 개의 곡선은 Site A에서의 지진재해도 곡선이다. 두 곡선 중 기호 ‘○’를 수반한 곡선은 단층지진원이 도입된 경우이며, 다른 하나는 단층지진원이 아직 도입되지 않은 경우이다. Site A에서는 단층지진원 도입 후 지진재해도가 감소했는데, 이는 Site A가 단층에서 먼 부지이고 단층지진원 도입 후 지진재해도가 단층 주변으로 집중되었기 때문이다. 한편, Fig. 4에서 실선으로 나타낸, 위 두 개의 곡선은 Site B에서의 지진재해도 곡선이다. 두 곡선 중 기호 ‘○’를 수반한 곡선은 단층지진원이 도입된 경우이며, 다른 하나는 단층지진원이 아직 도입되지 않은 경우이다. Site B에서는 단층지진원 도입 후 지진재해도가 증가했는데, 이는 Site B가 단층에 가장 가까운 부지이고 단층지진원 도입 후에 지진재해도가 단층 주변으로 집중되었기 때문이다. 요약하면, 기존에 알려지지 않은 단층이 확인되어 이를 새로운 단층지진원으로 도입하면 지진재해도 분포가 변하는데, 단층 주변의 부지에서는 단층지진원 도입 전보다 지진재해도가 증가하며 단층에서 멀어질수록 단층지진원 도입 전보다 지진재해도가 감소한다.

4. 토론 및 결론

단층에 대한 정보가 축적되고 새로운 조사방법이 도입됨에 따라 기존에 알려지지 않았던 단층이 확인되어 지진재해도 분석에 새로운 단층지진원으로 도입되는 경향이 있다. 새로운 단층지진원이 도입되면, 단층지진원을 일부라도 포함하는 면적지진원의 지진발생특성을 재평가해야 한다. 이때, 지진의 이중산입(Double Counting)을 배제하기 위해 단층지진원에서 발생한 지진을 면적지진원에서 제외해야 한다. 전술한 바와 같이, 이중산입

의 배제는 두 가지 방법을 통해 달성될 수 있다. 하나는 단층지진원에서 발생한 개별 지진을 확인하여 면적지진원의 지진목록에서 제하는 것이다 [3-6]. 이 방법은 가장 이상적인 방법이다. 그러나 단층지진원에서 발생한 지진을 모두 구별하는 것은 현실적으로 불가능하므로, 면적지진원 지진으로부터 단층지진원의 지진을 완전하게 분리할 수 없다는 한계가 있다. 다른 하나는 식 (1)을 이용하여, 면적지진원의 지진발생률에서 단층지진원의 지진발생률을 제하는 방법이다 [7, 12]. 단층지진원과 면적지진원간 지진 분리의 한계를 고려할 때 유망한 방법이라 할 수 있다. 그러나 이 방법은 첫째 방법과 달리 개별 지진을 제하는 것이 아니므로, 단층지진원 도입에 따른 면적지진원 최대지진의 변동이나 Richter-b 값의 변동에 대한 정보를 제공하지 못한다. 면적지진원의 최대지진은 관측 최대지진에 보정 항을 더해 결정되므로 [16], 관측 최대지진에 가장 민감하다. 큰 지진들은 작은 지진들에 비해 지진원 정보가 정확하고 가용한 정보가 많으므로, 개별 지진의 분리가 상대적으로 용이하다. 그러므로 단층지진원의 도입에 따른 면적지진원의 지진발생빈도 및 최대지진 재평가를 위해 두 가지 방법을 조합하여 사용할 필요가 있다. 불행히도, 두 가지 방법을 조합하더라도 Richter-b 값의 변동을 추정하기는 어렵다.

단층지진원을 새로 도입하면 일부 지진들(통상적으로 큰 지진들)이 단층지진원에서 발생한 것으로 확인되므로, 단층지진원을 중심으로 지진재해도 분포가 재배치된다. 새로운 단층지진원을 도입하면, 단층 주변의 부지에서는 지진재해도가 도입 전보다 증가하고 단층에서 멀어질수록 지진재해도가 도입 전보다 감소한다. 이를 반영하여 단층 주변 지역에서의 내진설계 수준은 상향조정하여 지진 안전성을 확보하고, 단층에서 먼 지역에서의 내진설계 수준은 하향조정하여 경제적인 내진설계를 유도할 필요가 있다. 이러한 목적을 달성하기 위해, 새로운 단층지진원이 확인된 경우에는 지진재해도를 재평가 할 필요가 있다.

/ 감사의 글 /

심사위원들의 검토의견을 통해 논문의 완성도가 제고되었습니다. 이에 논문을 심사해 주신 심사위원들께 감사드립니다. 본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다(No. 2205001).

/ REFERENCES /

- Kim YS, Research and development of active fault of Korea Peninsula, 2022 Jan 28, Available from: <https://www.ndmi.go.kr>.
- Nuclear Safety and Security Commission, Siting criteria for the nuclear reactor facilities, Notice No. 2017-15, 2017.
- Ornthammarath T, Warnitchai P, Chan C-H, Wang Y, Shi X., Nguyen PH, Nguyen LM, Kosuwan S, Thant M, Probabilistic seismic hazard assessments for Northern Southeast Asia (Indochina): Smooth seismicity approach, Earthquake Spectra, 2020;36(SI): 69-90.
- Peñarubia H, Johnson KL, Styron RH, Bacolcol TC, Sevilla WIG, Perez JS, Bonita JD, Narag IC, Solidum RU, Pagani MM, Allen TI.

- Probabilistic seismic hazard analysis model for the Philippines, *Earthquake Spectra*, 2020;36(SI):44–68.
5. Rong Y., Xu X, Cheng J, Chen G, Magistrale H, Shen Z-K. A probabilistic seismic hazard model for Mainland China, *Earthquake Spectra*, 2020;36(SI):181–209.
 6. Petersen MD, Shumway AM, Powers PM, Moschetti MP, Llenos AL, Michael AJ, Mueller CS, Frankel AD, Rezaeian S, Rukstales KS, McNamara DE, Okubo PG, Zeng Y, Jaiswal KS, Ahdi SK, Altekruise JM, Shiro BR. 2021 US national seismic hazard model for the State of Hawaii, *Earthquake Spectra*, 2022;38(2):865–916.
 7. Rivas-Medina A, Benito M, Gaspar-Escribano JM. Approach for combining fault and area sources in seismic hazard assessment: application in south-eastern Spain. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2018;18:2809–2823.
 8. Anderson JG and Luco JE. Consequences of slip rate constraints on earthquake occurrence relations. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1983;73(2): 471–496.
 9. Youngs RR and Coppersmith KJ. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1985;75(4):939–964.
 10. Thatcher W, Pollitz FF. Temporal evolution of continental lithospheric strength in actively deforming regions. *GSA Today*, 2008; 18(4):4–11.
 11. Murray JR, Minson SE, Svarc JL. Slip rates and spatially variable creep on faults of the northern San Andreas system inferred through Bayesian inversion of global positioning system data. *Jour. Geophys. Res. Solid Earth*, 2014;119(7):6023–6047.
 12. Ghione F, Poggi V., Lindholm C. A hybrid probabilistic seismic hazard model for Northeast India and Bhutan combining distributed seismicity and finite faults. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2021;123:1–18.
 13. Biasi GP. Appendix H: Maximum likelihood recurrence intervals for California paleoseismic sites. Open File Report 2013–1165. United States of Geological Survey.
 14. Pisarenko VF, Lyubushin AA, Lysenko VB, and Golubev TV. Statistical estimation of seismic hazard parameters: maximum possible magnitude and related parameters. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1996;86(3):691–700.
 15. Kijko A. Estimation of the maximum earthquake magnitude, m_{max} . *Pure and Applied Geophysics*, 2004;161(8):1655–1681.
 16. Noh M. A parametric estimation of Richter- b and m_{max} from an earthquake catalog. *Geosciences Journal*, 2014;18(3):339–345.
 17. Wells DL and Coppersmith KJ. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1994;84(4):794–1002.
 18. Hanks TC and Bakun WH. A bilinear source-scaling model for M-logA observations of continental earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2002;92(5):1841–1846.
 19. Hanks TC and Bakun WH. M-logA observations for recent large earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2008;98(1):490–494.
 20. Shaw BE. Constant stress drop from small to great earthquakes in magnitude-area scaling. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2009;99(2A):871–875.
 21. Stafford PJ. Source-scaling relationships for the simulation of rupture geometry within probabilistic seismic-hazard analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2014;104(4):1620–1635.
 22. Weichert DH. Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1980;70(4):1337–1346.
 23. Sadigh K, Chang C-Y, Egan JA, Makdisi F, and Youngs RR. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California Strong Motion Data. *Seism. Res. Lett.*, 1997;68(1):180–189.