

<Technical Report>

확률론적 단층변위 재해도 분석 기술현황과 적용

임창복[‡] · 심택모 · 최호선 · 양준모 · 박선정

한국원자력안전기술원 구조부지평가실

요 약

지진은 지진동을 발생시키며, 일정규모 이상의 지진이 발생할 경우에는 일반적으로 지표단층 변위를 수반한다. 단층 상부 또는 단층 인근에 위치한 주요 산업시설들은 지진동 이외에도 단층의 지표변위로 인해 심각한 손상을 입을 수 있다. 따라서 단층의 지표변위에 대한 잠재성과 영향을 평가하여 단층변위로 인한 영향범위로부터 피하거나 이를 수용할 수 있는 공학적 설계가 요구된다. 지진동에 의한 평가는 결정론적 방법과 확률론적 방법이 널리 적용되어 오고 있으며, 이에 대한 평가결과는 내진설계가 요구되는 건물, 교량, 파이프라인 및 원자력 시설 등 주요 산업시설에 반영되어 대비해오고 있다. 반면 단층의 지표변위 평가는 그동안 결정론적 방법의 존하여 주요 산업시설 부지의 선정과 건설에 고려되어 왔지만, 최근에는 확률론적 단층변위 재해 평가방법의 필요성이 대두되어 미국, 일본, 국제원자력기구 등에서 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다. 확률론적 단층변위 재해도 평가결과는 지표 또는 지표 가까이에서 단층의 각 변위량에 대한 연초과 빈도로 제시된다. 이들 평가 방법론에는 일반적으로 두 가지, 즉 지진 접근방법과 변위 접근방법이 적용되고 있다. 첫번째 방법은 지진발생으로 인한 지표면 또는 지표 가까이에서의 단층변위에 대한 평가로서 지진동 평가를 위한 확률론적 지진재해도 평가방법과 매우 유사한 방법으로 단층의 지표변위를 평가하는 방법이다. 두번째 방법은 단층의 지표변위를 직접적으로 평가하는 방법으로 단층변위 발생빈도와 이에 따른 단층변위 분포자료를 이용하는 방법이다. 본 연구에서는 확률론적 단층변위 재해도 분석을 수행하기 위한 방법론과 개념을 소개하고, 이들 분석 방법론을 국내에 적용시 고려되어야 할 사항에 대하여 논의하고자 한다.

주요어: 지표단층, 지진동, 결정론적 평가방법, 확률론적 평가방법, 단층변위재해

Chang Bock Im, Taek Mo Shim, Ho Seon Choi, Jun Mo Yang and Seon Jeong Park, 2016, Technical Status and Applications of the probabilistic fault displacement hazard analysis. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 4, p. 447-455

ABSTRACT: Earthquakes generate vibratory ground motions, and also are generally accompanied by the surface fault displacements in the case that the earthquake magnitude is more than a certain level. Because surface fault displacements can cause significant damages to the important industrial facilities located on or near faults, it is important to assess the possibility for surface fault displacements at their sites. Thus, structural engineering design is required to accommodate the effect of the potential fault displacements. Vibratory ground motions have widely been evaluated based on both deterministic and probabilistic methods, and their evaluation results have been reflected in aseismic design of important buildings, bridges, pipelines, and nuclear facilities. And the structural integrity of their facilities should be maintained from the vibratory ground motion. On the other hand, in case of evaluation of surface fault displacement, the determination method has been considered for site selection and construction of important industrial facilities. However, recently the need for the evaluation of Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA) has been issued and actively studied in the USA, Japan, IAEA, etc. PFDHA results are presented as the annual frequency of exceedance for various levels of surface displacement. Two approaches are presented for PFDHA; the earthquake approach and the displacement approach. The first relates the estimation of fault displacements at or near the ground surface due to the occurrence of earthquakes in the similar manner as is performed in the probabilistic seismic hazard analysis (PSHA). The second approach is derived directly from the characteristics of the faults at the site of interest, which requires the rate of displacement events and the distributions for fault displacements. In this paper, we summarize PFDHA methodologies, their basic concepts, and also propose some suggestions to be considered for application to our country.

[‡] Corresponding author: +82-42-868-0175, E-mail: k136icb@kins.re.kr

Key words: surface fault, vibratory ground motion, deterministic assessment, probabilistic assessment, fault displacement hazard

(Chang Bock Im, Taek Mo Shim, Ho Seon Choi, Jun Mo Yang and Seon Jeong Park, Structural Systems & Site Evaluation Dept., Korea Institute of Nuclear Safety, 62 Gwahak-ro, Yusung-gu, Daejeon 34142, Republic of Korea)

1. 서 론

댐, 교량, 터널, 송유관 및 원자력시설 등 주요 산업시설들은 지진발생에 따른 지진동과 단층변위 현상으로부터 시설의 안전성이 확보될 수 있는 부지에 건설되어야 한다. 지진동에 대해서는 부지선정 및 설계단계에서 일정 범위의 지역을 대상으로 지진발생 가능성을 평가하고 결정론적 방법과 확률론적 방법을 적용하여 시설부지에 미치는 설계지진을 결정하고 시설의 특성 등을 고려한 여유도를 감안하여 내진설계를 적용하여 건설함으로써 대비하고 있다. 지진동 평가결과의 신뢰도를 향상하기 위하여 1960년대에 이르러 확률론적 지진재해도 평가방법(PSHA; Probabilistic Seismic Hazard Analysis)을 개발하여 적용하고 있으며, 최근에는 설계지진 평가의 기술기법에 대해서도 지속적인 연구가 진행 중에 있다(Cornell, 1968; McGuire, 1995; SSHAC, 1997; US NRC, 2007; ANSI/ANS-2.29, 2008; Kammerer and Ake, 2012).

반면, 지진발생에 따른 지표변위 등 지표변형 영향에 대해서는 상세한 지질조사를 수행한 후 결정론적인 평가를 통하여 영구 지표변형 발생 가능성이 있는 지역의 경우, 시설물로부터 일정거리 이상을 이격하여 건설함으로써 영구 지표변형 영향에 대비해오고 있다. 예를 들면, 미국 캘리포니아주, 유타주, 대만 및 뉴질랜드의 경우는 주요 산업시설 등의 부지 및 인근지역에 대한 상세한 지질조사를 수행하고, 지진발생원 단층이 존재할 경우에는 이로부터 일정거리를 이격하여 건설하도록 규정하고 있다(IAEA, 2015b). 특히 미국 원자력규제위원회(US NRC, 2014)는 영구 지표변형의 경우 원자로건물 등 원자력안전시설의 하부나 영향범위 내에 활동성 단층(capable fault)이 존재하지 않도록 규정하고 있다. 참고로 원자력 산업에서는 활동성 단층이라는 용어를 도입하여 별도로 정의하고 있다(Im *et al.*, 2004, 2005).

확률론적 지진재해도 평가 방법과는 다르게 확률론적 단층변위 재해도 평가방법은 최근 지질학적, 지형학적, 그리고 고지진학적 조사기법의 발전과 과

거 지진발생에 따른 실제 현장 자료가 축적됨으로 인해 지표 또는 지표인근 단층균열로부터 예상되는 지표 및 지표 인근에서의 영구지표변형을 정량화할 수 있게 되었다. 즉, 신기지층 변형의 위치, 주기 및 변형량을 평가하는 것이 가능하게 되어 연구가 활발하게 진행 중에 있다(Field *et al.*, 2008; Moss and Ross, 2011; Wells and Kulkarni, 2014; IAEA, 2015a, 2015b). 또한 공학기술의 발전으로 일정 수준의 지표변형 현상을 설계에 반영하여 건설함으로써 댐, 교량, 터널, 송유관 및 원자력시설 등 주요 산업시설의 안전성이 유지될 수 있도록 하는 수준에 이르게 되었다. 그 결과 영구지표변형에 대한 특성화는 해당 지역에 위치하고 있는 주요 산업시설들을 위한 설계 입력자료의 확보에 중요한 단계이며, 이들 평가결과는 각 시설의 위험도 수준과 설계요건 등을 종합적으로 고려하여 적절하게 반영되어야 한다.

특히, 최근 단층에 대한 지질조사 기법의 향상과 다양화로 주요 산업시설의 부지선정과 설계단계에서는 확인되지 않았던 신기단층이 그 이후에 확인됨으로써, 지진동 및 지표변위 안전성에 대한 논란이 지속적으로 제기되고 있는 실정이다. 이에 대한 해결방법 중의 하나로 확률론적 단층변위 재해도 방법론이 최근에 이슈화되어 이에 대한 연구가 진행 중이며, 아직은 체계적인 방법론이 제대로 정립되어 있지는 않은 실정이다. 국제원자력기구(IAEA, 2010)는 안전기술기준을 발간하여 기존 원전부지 및 인근에 활동성 단층이 확인되는 경우에는 확률론적 단층변위 재해도 분석을 통해 원자력시설들의 안전성 여부를 평가하도록 요구하고 있으며, 미국 원자력학회(ANSI/ANS-2.30, 2015)등에서도 이에 대한 평가방법을 도입하여 적용하려는 움직임이 일고 있다.

이들 방법론에 대한 기본적인 개념은 주요 산업시설들을 위한 신규 부지는 상세한 조사를 통해 지표변형 영향이 없는 부지를 선정하면 문제가 되지 않지만, 기존 부지의 경우에는 부지인근에 단층이 확인되어 어려운 환경을 겪고 있어 터널, 교량, 댐, 그리고 원자력발전소와 같은 주요 시설들의 안전성을

위해 확률론적 단층변위 재해도 평가의 적용이 증가 되는 추세이다.

우리나라는 국토 면적에 비해 주요 산업시설 분포 밀도가 다른 나라에 비해 상대적으로 높은 지역이면서, 최근에 중규모 지진의 발생과 동해안 일부 지역을 중심으로 신기 단층들이 발견되어 활성단층에 대한 논란이 지속되고 있어 이들 방법론에 대한 검토와 정립, 그리고 적용이 불가피하게 요구될 수 있다. 이들 방법들은 또한 이들 산업시설의 부지를 선정하거나 건설시 이들로 인한 재해 가능성이 있는 지역들을 초기단계에서 배제하는 데에도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

확률론적 단층변위 재해도 평가결과는 지표 또는 지표 가까이에서 단층의 각 변위량에 대한 연초과 빈도로 제시된다(그림 1). 분석의 목적은 특정 부지에서 단층의 지표변위에 따른 연초과 빈도 또는 가능성을 평가하는 것으로, 일반적으로 시설을 중심으로 하여 반경 5 km 이내에 분포하는 잠재 지진원 단층에 관한 충분한 정보를 얻을 수 있는 부지특성 프로그램을 근거로 수행하며, 확률론적 단층변위 재해도 분석을 완성할 수 있는 적합한 지침(Kammerer and Ake, 2012)에 따라 수행하는 것이 필요하다. 이들 분석 방법론에는 일반적으로 두 가지 방법론이 고려되고 있다. 첫 번째 방법론은 지표면 또는 지표 가까이에서의 지진발생으로 인한 단층변위 발생에 대한 평가이며, 이는 지진동 평가를 위한 확률론적 지진재해도 평가방법과 유사한 방법으로 지진동 감쇄함수를 단층변위 감쇄함수로 대체함으로써 평가하는 방법이다. 두 번째 평가방법은 단층변위 발생 빈도와 이에 따른 단층변위 분포자료를 이용하는 방법으로 지진원에 대한 메카니즘 규명과는 관계없이 평가대상 단층지점에서 관찰되는 단층 또는 지질특성 자료를 직접 활용하여 평가하는 방법이다.

본 연구에서는 확률론적 단층변위 재해도 분석을 수행하기 위한 상기 두 가지 방법론과 개념을 소개하고, 국내에 적용할 경우 고려되어야 할 사항들에 대하여 토의하고자 한다.

2. 확률론적 단층변위 재해도 평가 방법론

확률론적 단층변위 재해도는 특정부지에서 단층의 지표변위에 따른 연초과 빈도 또는 가능성을 평

가하는 것으로, 그림 1과 같이 단층변위별 연초과 빈도로 그 결과가 제시되며, 그림 2는 재해도 평가에

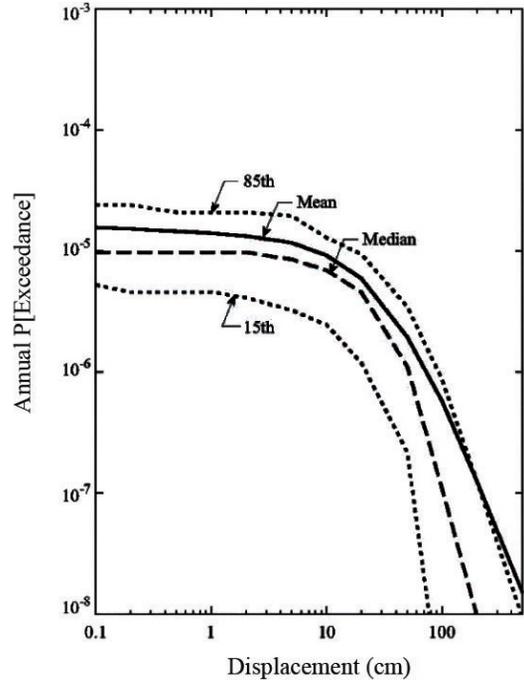


Fig. 1. Example of Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA) curves for a site at Yucca Mountain (from ANSI/ANS-2.30, 2015).

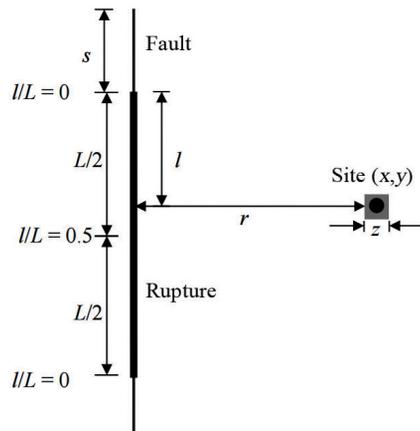


Fig. 2. Definition of variables used in the Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (from ANSI/ANS-2.30, 2015). L is the length of surface rupture on principal fault; l is the distance on the surface rupture; r is the distance from the principal fault; and z is the dimension of the area considered for calculating the probability of fault rupture (area z^2), respectively.

Table 1. Inputs and data needed for the Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (from IAEA, 2015a).

Input to PFDHA	Data needed
Direct method (Displacement method)	
Location of faults	Maps of faults
Frequency of displacement events based on slip rate and average displacement per event	Paleoseismic estimates of displacement per event Slip rates Total length of fault Cumulative displacement on fault Scaling relationships between fault slip and fault dimensions
Probability of exceeding specific amounts of slip	Compilations of measured slip at sites with multiple ruptures Compilations of measured slip versus fault dimensions
Earthquake method (principal fault)	
Location of principal faults	Maps of active faults
Probability of principal surface rupture	Down dip geometry of faults Depth distribution of earthquakes Relationships between earthquake magnitude and rupture dimensions Frequency of surface rupture as function of magnitude
Slip distribution function	Mapped displacement profiles for surface rupturing earthquakes: maximum and average displacements Paleoseismic estimates of displacement per event Slip rates Paleoseismic recurrence intervals Total length of fault
Earthquake method (distributed fault)	
Location of principal faults	Maps of active faults
Probability of distributed rupture	Maps of distributed ruptures in historical earthquakes, as function of magnitude, style of faulting, distance from principal fault, hanging/food wall
Slip distribution function	Measurements of the amplitude of distributed slip on individual ruptures indicating location with respect to the principal rupture

사용되는 각 변수들을 보여준다.

확률론적 단층변위 재해도 평가에는 두 가지 방법, 즉 지진을 기반으로 하는 평가방법론(earthquake-based approach)과 단층변위를 기반으로 하는 평가방법론(displacement-based approach)으로 구분할 수 있다. 이 두 가지 평가방법 중에서 어느 방법을 적용하느냐 하는 문제는 평가하고자 하는 대상 부지에서 얻을 수 있는 유효한 정보들로부터 결정된다. 즉, 부지에서 고지진학적 조사 등을 통해 평가하고자 하는 단층에 대한 변위이력 정보(변위위치, 변위량, 변위 분포, 변위재래주기)를 얻을 수 있으면 변위를 기반으로 하는 평가방법이 적합하다. 반면 그렇지 못한

부지에서는 지진을 기반으로 하는 평가방법이 효과적이다. 확률론적 단층변위 재해도 평가에 중요한 매개변수들은 표 1에 표시하였다.

2.1 지진을 기반으로 하는 평가방법론 (earthquake-based approach)

확률론적 단층변위 재해도 평가에 적용되는 일반적인 함수는 확률론적 지진재해도 평가 함수(1)로부터 직접적으로 유도된다. 확률론적 지진재해도 평가는 일반적으로 부지 k 에서 지진동 매개변수, Z (즉, 최대지반가속도 또는 지반응답스펙트럼 가속도)가 특정 지진동 수준 z 를 초과할 연 지진발생 확률

(annual rate of earthquakes, $\nu_k(z)$)로 나타내며, 다음과 같이 표현된다(Cornell 1968).

$$\nu_k(z) = \sum_n \alpha_n (m^0) \int_{m^0}^{m_n^*} f_n(m) \left[\int_0^\infty f_{kn}(r|m) \cdot P(Z > z|m, r) \cdot dr \right] \cdot dm \quad (1)$$

여기서, $\alpha_n (m^0)$ 는 지진원 n 에서 공학적으로 중요한 규모(m^0)이상 모든 지진의 연 발생률(rate of all earthquakes)이며, $f_n(m)$ 은 지진원 n 에서 지질공학적으로 의미있는 최소 지진규모 m^0 와 최대지진 m_n^* 사이의 확률밀도함수이다. $f_{kn}(r|m)$ 은 지진원 n 에서 발생하는 지진규모 m 에 대하여 부지 k 로부터 거리 r 에서의 조건부 확률 밀도함수(conditional probability density function)이며, $P(Z > z|m, r)$ 는 부지 k 로부터 거리 r 지점에서 지진규모 m 의 최대지진동 z 를 초과할 조건부 확률로서 지진동 감쇄모델을 통해 얻어지는 부지에서의 지진동 발생확률을 의미한다.

반면, 지진을 기반으로 하는 확률론적 단층변위 재해도 평가방법은 지진원 단층 상에서 하나의 지진으로 인한 변위 D 가 어느 특정 변위 d 를 초과하는 정도(rate)를 평가하는 방법으로 함수(1)을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\nu_k(d) = \sum_n \alpha_n (m^0) \int_{m^0}^{m_n^*} f_n(m) \left[\int_0^\infty f_{kn}(r|m) \cdot P_{kn}^*(D > d|m, r) \cdot dr \right] \cdot dm \quad (2)$$

여기서, $P_{kn}^*(D > d|m, r)$ 는 규모 m 의 지진이 거리 r 만큼 떨어진 곳에서 발생할 경우, 지표면 또는 지표 가까이에서 단층변위에 대한 감쇄함수이다. 변위감쇄함수는 다음과 같이 두 개의 항을 포함한다는 점에서 함수(1)의 지진동감쇄함수와 상이하며, P^* 로 나타낸다.

$$P_{kn}^*(D > d|m, r) = P_{kn}(slip|m, r) \cdot P_{kn}(D > d|m, r, slip) \quad (3)$$

함수(3)에서 첫 번째 항, $P_{kn}(slip|m, r)$ 은 부지로부터 r 만큼 떨어진 지점에서 규모 m 을 갖는 n 번째 지

진원으로부터 지진발생시 단층상의 지점 k 에서 변위가 발생할 조건부 확률을 의미한다. 확률론적 지진재해도 평가에서는 미소지진이라고 해도 단층상의 지점 k 에서 매우 작지만 일정수준의 지진동을 발생시킨다고 가정 [$P_{kn}(shaking|m, r) = 1$] 한다. 하지만 모든 지진이 발생한다고 해서 단층의 변위를 발생시키지는 않는다.

함수(3)에서 두 번째 항은 단층 변위량에 대한 조건확률 분포를 의미한다. 이 확률은 지진동 감쇄식에서 규모 m 과 거리 r 의 함수로서 z 에 대한 로그 정규분포를 정의하는 것과 동일한 방법으로 규모 m 와 거리 r 의 함수인 매개변수들의 연속분포를 이용하여 계산된다. 변위는 단층길이에 따른 부지의 상대적 위치에 따라 좌우된다. 그림 3과 4는 각각 확률론적 지진재해도 평가와 지진을 기반으로 하는 확률론적 단층변위 재해도 평가방법론에 대한 체계적인 절차도를 보여준다.

지진을 기반으로 하는 평가방법론은 2가지 유형의 지표단층 변위, 즉 주단층 변위(principal-fault displacement)와 부수단층 변위(distributed-fault displacement)로 구분된다(Youngs *et al.*, 2003; Petersen *et al.*, 2011). 주단층은 일반적으로 지진발생 동안 지진에너지가 집중 방출하여 변위가 발생하는 단층으

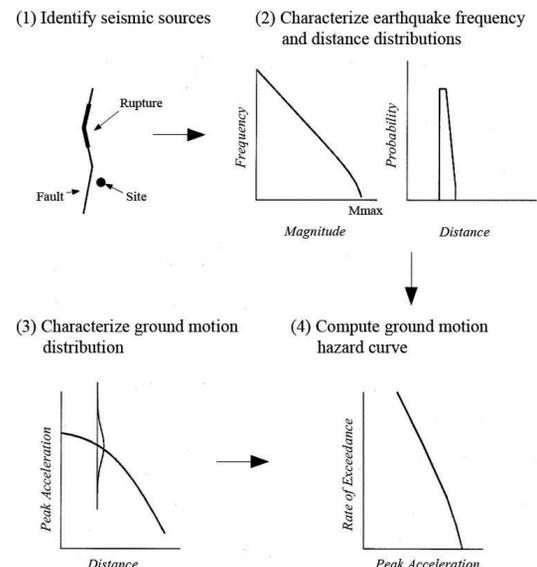


Fig. 3. Schematic diagram illustrating the components of Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) for ground shaking (from Youngs *et al.*, 2003).

로 지표면상에서는 좁고 수m에서 수십m의 폭을 갖는 하나의 연속적인 선 또는 균열대 양상을 보인다. 균열대 내에서는 주단층과 평행 또는 아평행의 양상을 보이는 여러 단층들이 수반되며 발달한다. 반면에, 부수단층은 주단층 운동에 수반되며, 단층, 전단 또는 파쇄형태로 나타나며, 주단층으로부터 일반적으로 수십m에서 수km 이내 지역에서 발달하며, 일반적으로 불연속적인 양상으로 나타나며, 주단층보다는 소규모의 지진과 변위를 수반한다.

2.2 변위를 기반으로 하는 평가방법론 (displacement-based approach)

변위를 기반을 하는 단층변위 재해도 평가에 중요한 매개변수들은 단층분포 위치, 단층 변위량과 재래주기이며, 가장 효과적인 평가는 평가대상 단층지역에서 고지진학적 조사 등을 통해 획득한 단층변위에 대한 측정 자료와 연대분석 자료를 이용하는 것이다. 경우에 따라서는 현장에서 이들 자료를 얻을 수 없을 경우가 있으며, 이럴 경우에는 유사지역의 자료를 활용하여 평가할 수도 있다.

특정변위 d 의 초과확률(exceedance rate)은 다음과 같이 간단한 함수로 표현할 수 있다(Youngs *et al.*,

2003).

$$\nu(d) = \lambda_{DE} \cdot P(D > d_{slip}) \tag{4}$$

여기서, 첫 번째 항 λ_{DE} 은 단층 변위율로서 단층의 연대측정으로부터 평가되며, 두 번째 항 $[P(D > d_{slip})]$ 은 하나의 지진발생에서 발생하는 변위 D 가 특정 변위 d 를 초과할 조건부 확률로서 이상적으로는 이들 단층들로부터 측정된 변위분포로부터 평가된다.

함수(4)에서의 단층변위율은 직접적으로 이들 변위를 일으킨 지진원 메카니즘에 대한 규명없이도 평가가 가능하기 때문에 주단층과 부수단층의 구분을 고려하지 않는다.

단층변위율에 대한 두가지 평가방법이 있다. 즉 고지진학적 연대측정자료와 변위를 자료로부터 직접적으로 재현주기(λ_{DE} 의 역수)를 평가하는 방법이다. 이 방법은 고지진학 자료로부터 하나의 단층에서 지진발생빈도를 평가하는데 사용되는 방법과 동일하다. 초과조건 확률 $[P(D > d_{slip})]$ 은 부지에서의 변위 D 가 어느 특정 변위값 d 를 초과할 확률을 의미한다.

3. 외국의 적용사례

Petersen *et al.* (2011)에 따르면 지진에 수반된 단층의 지표변위 현상으로 인해 발생된 과거의 대표적인 피해사례에는 교량(일본, 1995; 대만, 1999; 터키, 1999), 댐(대만, 1999), 빌딩(미국 캘리포니아, 1971; 터키, 1999), 철로(과테말라, 1976), 터널(대만, 1999), 그리고 파이프라인(미국 캘리포니아, 1971; 미국 알래스카, 2001)이 있다.

전술한 바와 같이 지진발생에 따른 지진동에 대한 내진설계 방법 및 관련 기술기준과는 다르게 지표 단층 변위발생에 따른 대처 설계방법과 관련 기술 기준 등은 최근에 미국, 일본, 그리고 국제원자력기구(IAEA, 2010, 2015a, 2015b) 및 미국표준협회/미국원자력학회(ANSI/ANS-2.30, 2015)등에서 활발한 연구가 진행되고 있는 실정이다. 미국의 캘리포니아 주 및 유타주(솔트레이크 카운티), 대만, 뉴질랜드 등에서는 각각 활성단층으로 정의된 단층의 상부 또는 인근에 주요시설의 건설을 제한하여 지표단층 변위 발생에 따른 재해를 최대한 피하도록 하는 규제요건

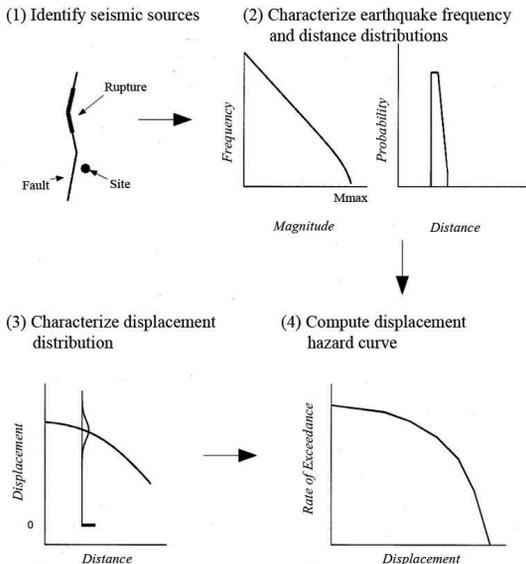


Fig. 4. Schematic diagram illustrating the components of the earthquake approach to Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA) (from Youngs *et al.*, 2003).

을 이행하고 있다. 예를 들면 캘리포니아주에서는 상세한 지질조사를 수행하여 단층이 심각한 재해를 주지 않음을 입증하지 못하면 주에서 정의한 활성단층(active fault)으로부터 30 m 이내에 가옥 및 건물 등의 건설을 제한하고 있다. 최근에 평가한 대표적 사례에는 미국 디아브로 캐년 원자력시설(US NRC, 2012), 미국 버클리대학의 메모리얼 스타디움, 그리고 네바다주 유카산의 고준위 방사성폐기물 처분장 후보지(Stepp *et al.*, 2001; Youngs *et al.*, 2003)를 들 수 있다.

주요 산업시설 구조물들에 대한 지표단층 변위발생에 의한 영향을 완화하기 위한 공학적 해결방법들도 개발되고 있다. 예를 들면 2002년 알래스카에서 규모 7.9로 부터 발생한 지표단층 변위에 대해서도 주요한 송유관이 설계 당시에 단층의 지표변위에 대비하여 상당한 유연성을 허용하여 수m의 변위 발생에도 심각한 피해를 받지 않은 사례도 있다. 이 처럼 이들 구조물 기초지반에서 발생 가능한 수준의 변위에 대한 재해도를 평가하여 설계에 반영함으로써 구조물들의 기능을 유지하도록 할 수 있으며, 일반적으로 공학적 설계에 이러한 재해도 평가내용을 적용하는 데는 경제적, 사회적, 그리고 환경적 여건 등을 종합적으로 고려하고 있는 추세이다.

4. 토 의

4.1 불확실성 평가

모든 확률론적 방법들은 관련된 여러 매개변수들의 불확실성을 정량화하고 현상들을 모델화 하는 것이 가장 중요하며, 이들의 정량화는 재해도 평가결과에 중요한 영향을 준다. 확률론적 지진재해도 분석(PSHA)과 확률론적 단층변위 재해도 분석(PFDHA)을 포함한 확률론적 재해도 분석에는 분석에 필요한 지진발생 메카니즘 등에 관한 정보에 아직까지는 상당한 불확실성을 내재하고 있다. 확률론적 단층변위 재해도 평가는 평가대상의 단층 상에서 발생 가능한 지진규모, 지진발생 위치, 지진규모 분포, 지진 발생 빈도, 단층의 지표변위 발생확률, 그리고 단층 맵핑의 정밀도 등의 중요한 지질학적 인자들이 고려된다.

일반적으로 현재의 기술수준에서의 확률론적 재해도 분석에는 두 가지 유형의 불확실성, 즉 지식적

불확실성(epistemic uncertainty)과 우연적 불확실성(aleatory uncertainty)으로 구분하고 있다. 지식적 불확실성은 적용모델들의 유효성(validity)과 모델의 입력 매개변수 값에 관한 지식의 한계에서 기인하는 불확실성으로 앞으로 더 많은 관련 정보가 수집됨에 따라 지식적 불확실성은 감소될 수 있다. 지식적 불확실성의 예로는 하나의 주어진 지진원에 대한 규모 분포의 패턴이라고 할 수 있다. 우연적 불확실성은 물리적 과정들의 자연적 변동성(natural variability)으로부터 기인한다. 하나의 단층 상에서 다음 지진의 규모, 위치 및 발생시점이 우연적 불확실성에서 고려되는 사례들이다. 확률론적 재해도 분석에서 요구되는 각 매개변수에 대한 불확실성을 고려한 확률밀도함수는 현 기술수준으로 감소시키는 데는 한계가 있다. 그러나 앞으로 이들 매개변수에 대한 확률분포에 대한 지식이 향상된다면 우연적 불확실성은 점차 줄어들 수 있는 있을 것이다.

이들 두 가지 유형의 불확실성은 확률론적 재해도 분석에서 다르게 정의되어 고려된다. 즉, 일반적으로 하나의 자연 상태에 관한 가정조건 하에서 일부 매개변수들을 초과할 확률을 얻기 위해 무작위로 (randomly) 분포변수에 걸쳐 수행하여 하나의 재해도 곡선을 얻을 수 있다. 반면 이 재해도 곡선에 대한 불확실성, 즉 지식적 불확실성은 다양한 가정, 가설, 모델, 또는 매개변수들을 종합함으로써 고려한다. 이들 다양한 해석들은 분석을 통해 이루어지며, 일련의 재해도 곡선과 그들에 수반되는 가중치들로 표현된다. 하나의 재해도 곡선은 무작위 변수들을 종합함으로써 얻어지며, 많은 수의 재해도 곡선들은 논리수목(logic tree) 방법을 이용한 지식적 불확실성을 나타내는 모델 매개변수들을 조합함으로써 얻어지며, 여러 백분위수(percentile) 재해도 곡선들로 나타난다. 논리수목 방법은 확률론적 단층변위 재해도 분석평가에 관련된 입력 자료의 지식적 불확실성을 감소시키는 데 널리 이용되고 있다.

확률론적 지진재해도 평가방법론은 방법론에 수반된 불확실성을 다루고 모델화하는데 수십 년간의 논쟁과정을 통해 한층 진보된 방법론을 정립하여 적용해 가고 있지만, 확률론적 단층변위 재해도 분석 방법론은 상대적으로 최근 개발된 방법으로 분석에 관련된 불확실성에 대해 계산적 방법과 절차적인 관점에서 잘 정립되어 있지는 않다. 이들 불확실성은

고유의 단층운동 과정과 관련 정보의 부족에서 기인한 다양성에 대한 한계와 범위의 관점에서 연구가 활발하게 진행 중에 있다(Stepp *et al.*, 2001; Petersen *et al.*, 2011; ANSI/ANS-2.30, 2015; IAEA, 2015a). 일반적으로 결정론적 단층변위 재해도는 확률론적 단층변위 재해도보다 보수적인 값이 제시되며, 확률론적 단층변위 재해도 평가는 단층의 타입(정단층, 주향이동단층, 역단층)에 따라 각기 다른 평가결과들을 보여준다. 따라서 단층 타입에 따른 여러 경험적 단층변위 모델과 대상지역들의 평가결과를 상호 비교한 다양한 모델을 제시하고 있다(Youngs *et al.*, 2003; Moss and Ross, 2011; IAEA, 2015b). 일반적으로 자료와 모델들은 세 가지 단층타입들의 중앙부 가까이는 유사한 경향을 보이나, 주향이동단층의 말단부 인근에서의 변위 값은 역단층과 정단층 변위 값보다 낮은 경향을 보인다(IAEA, 2015b).

4.2 국내 적용가능성 검토

우리나라의 경우, 제4기 단층에 대한 연구가 2000년 초반에서야 활발하게 이루어지기 시작하였고, 지체구조 상 일본, 미국 등에 비해 상대적으로 안정된 지괴에 위치하는 관계로 확률론적 재해도 평가에 필요한 많은 지질 및 지진학적 자료의 확보가 미비한 실정이다. 최근 양산단층 및 울산단층 주변 등 일부 지점들에서 제4기 단층에 대한 보고와 관련 조사 자료가 발표되고 있다. 조사결과에 대한 이견은 있지만 인근지역 원자력시설의 지진 안전성에 대한 논란도 지속적으로 제기되고 있다. 이들 지역의 일부 단층들에 대해서는 원자력시설의 지진 안전성 차원에서 확률론적 지진 재해도에 대한 평가가 수행된 바 있지만 확률론적 단층변위 재해도 평가를 수행한 사례는 없다. 하지만 최근 발견된 제4기 단층 중에서 일부 단층에 대해 활성 가능성이 제기되어 원전의 지진 안전성에 대한 논란이 제기된 바도 있고, 앞으로도 원자력시설을 포함한 주요 산업시설 부지 및 그 인근에서 활성단층을 발견할 가능성도 전혀 배제할 수 없는 상황이라 이들 산업시설들의 지속적인 지진 안전성 논란이 예상된다. 따라서 확률론적 단층변위 재해도 평가에 대한 이해와 관련 기술기준 수립이 필요할 것으로 사료된다.

이를 위해서는 관련 제4기 단층에 대한 체계적인 조사와 평가를 통해 단층변위 재해도 평가에 필요한

입력 자료의 객관적이고 체계적인 데이터베이스 구축이 요구된다. 일부 부족한 입력 자료에 대해서는 외국의 유사한 경험 자료를 활용한다고 하더라도 분야성격 상 국내의 지질 및 단층의 특성이 외국의 경우와 상이하므로 이에 대한 불확실성을 감안하여 국내 고유의 자료 확보에 최대한 노력하는 것이 매우 중요하다.

다음으로는 미국(ANSI/ANS-2.26, 2004)과 같이 설계대상 구조물, 계통 및 기기들에 대한 단층 재해도를 분석하여, 위험도 수준에 따라 구조물, 계통 및 기기들에 대한 등급을 구분하고, 수용할 수 있는 단층변위에 대한 연초과 발생확률에 대한 기술기준 수립이 필요하며, 부지선정, 그리고 건설 및 설계에 이들 확률론적 단층변위 재해도 평가결과의 반영이 필요하다. Wells and Kulkarni (2014)는 단층변위에 따른 피해결과와 위험도가 동일한 수준에서의 지진동보다 훨씬 크기 때문에 확률론적 단층변위 재해도 평가 및 설계 입력 자료를 통해 지진동보다 훨씬 더 긴 재현주기의 고려가 필요하다고 제안하였다. 주요 산업기반시설 부지에 대한 이러한 새로운 확률론적 단층변위 재해도 평가는 활성단층에 대한 조사 자료의 축적과 더불어 주요 시설물들의 안전을 확보하는데 크게 기여하게 될 것이다.

사 사

이 연구는 정부(원자력안전위원회)의 지원으로 한국원자력안전기술원이 2016년도 원자력안전규제 사업으로 수행한 연구(과제명: 원자력시설 부지감시, A3FD16041)입니다. 논문을 검토하고 좋은 의견을 제시해 주신 한국수력원자력(주) 중앙연구원 장천중 처장님과 부경대학교 김영석 교수님께 감사드립니다. 또한 논문에 포함된 그림, 수식 등의 편집에 많은 도움을 준 한국원자력안전기술원 김령이 인턴 사원에게도 감사드립니다.

REFERENCES

- ANSI/ANS-2.26, 2004, Categorization of nuclear facility structures, systems, and components for seismic design. An American National Standard, Published by the American Nuclear Society, 555 N. Kensington Ave. La Grange Park, IL 60526, 23 p.

- ANSI/ANS-2.29, 2008, Probabilistic seismic hazard analysis. An American National Standard, Published by the American Nuclear Society, 555 N. Kensington Ave. La Grange Park, IL 60526, 33 p.
- ANSI/ANS-2.30, 2015, Criteria for assessing tectonic surface fault rupture and deformation at nuclear facilities. An American National Standard, Published by the American Nuclear Society, 555 N. Kensington Ave. La Grange Park, IL 60526, 50 p.
- Cornell, C.A., 1968, Engineering seismic risk analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, 1583-1606.
- Field, E.H., Dawson, T.E., Felzer, K.R., Frankel, A.D., Gupta, V., Jordan, T.H., Parsons, T., Petersen, M.D., Stein, R.S., Ray, J., Weldon II, R.J. and Wills, C.J., 2008, The uniform California earthquake rupture forecast, Version (UCERF 2). 2007 By Working Group on California Earthquake Probabilities, USGS Open File Report 2007-1437, U.S. Geological Survey, U.S. Department of the Interior, 96 p.
- IAEA, 2010, Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations. IAEA Safety Standards, Specific Safety Guide No. SSG-9, International Atomic Energy Agency, Vienna, 60 p.
- IAEA, 2015a, Ground motion simulation based on fault rupture modeling for seismic hazard assessment in site evaluation for nuclear installations. IAEA Safety Reports Series No. 85, International Atomic Energy Agency, Vienna, 126 p.
- IAEA, 2015b, International workshop on best practices in physics-based fault rupture models for seismic hazard assessment of nuclear installations. Proceeding of Papers, 18-20, November 2015, Vienna International Center, Board Room, M building, Vienna, Austria, 72 p.
- Im, C.B., Noh, M., Shim, T.M., Lee, H., Choi, H.S. and Kim, H. J., 2004, Capable fault criteria applied to nuclear power plant sites, and their technical background. *Journal of the Geological Society of Korea*, 40, 279-284 (in Korean).
- Im, C.B., Shim, T.M., Noh, M., Lee, H. and Choi, H.S., 2005, A review on geological investigation standards for nuclear power plant sites. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 287-293 (in Korean).
- Kammerer, A.M. and Ake, J.P., 2012, Practical implementation guidelines for SSHAC Level 3 and 4 Hazard Studies. NUREG-2117, Rev. 1, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC., 235 p.
- McGuire, R.K., 1995, Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes-Closing the loop. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85, 1275-1284.
- Moss, R.E.S. and Ross, Z.E., 2011, Probabilistic fault displacement hazard analysis for reverse faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101, 1542-1553
- Petersen, M.D., Dawson, T.E., Chen, R., Cao, T., Wills, C.J., Schwarz, D.P. and Frankel, A.D., 2011, Fault displacement hazard for strike-slip faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101, 805-825.
- Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC), 1997, Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: Guidance on uncertainty and use of experts. NUREG/CR-6372, UCRL-ID-122160, Vol. 1 & 2, Prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. Department of Energy, Electric Power Research Institute, 1, 160 p.
- Stapp, J.C., Wong, I., Whitney, J., Quittmeyer, R., Abrahamson, N., Toro, G., Youngs, R.R., Coppersmith, K., Savy, J., Sullivan, T. and Yucca Mountain PSHA Project Members, 2001, Probabilistic seismic hazard analyses for ground motions and fault displacement at Yucca Mountain, Nevada. *Earthquake Spectra*, 17, 113-150.
- US NRC, 2007, A performance-based approach to define the site-specific earthquake ground motion. Regulatory Guide 1.208, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, March 2007, 53 p.
- US NRC, 2012, Confirmatory analysis of seismic hazard at the Diablo Canyon power plant from the shoreline fault zone. Research Information Letter 12-01, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, September 2012, 177 p.
- US NRC, 2014, Standard Review Plan, 2.5.3 Surface deformation. NUREG-0800, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC., 21 p.
- Wells, D.L. and Kulkarni, V.S., 2014, Probabilistic and deterministic fault displacement hazard analysis - Sensitivity analyses and recommended practices for developing design fault displacements. Proceedings of the 10th National Conference in Earthquake Engineering. Earthquake Engineering Research Institute, Anchorage, AK, 1-10.
- Youngs, R.R., Arabasz, W.J., Anderson, R.E., Ramelli, A.R., Ake, J.P., Slemmons, D.B., McCalpin, J.P., Doser, D.I., Fridrich, C.J., Swan, F.H., Rogers, A.M., Yount, J.C., Anderson, L.W., Smith, K.D., Bruhn, R.L., Knuepfer, P.L.K., Smith, R.B., de Polo, C.M., O'Leary, D.W., Coppersmith, K.J., Pezzopane, S.K., Schwartz, D.P., Whitney, J.W., Olig, S.S. and Toro, G.R., 2003, A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA). *Earthquake Spectra*, 19, 191-219.

Received : July 4, 2016

Revised : August 1, 2016

Accepted : August 1, 2016