



# 신규 활성단층 대비 한수원 수력·양수댐 지진안전성평가



정병수 수력처장  
한국수력원자력



곽상신 수력토건부부장  
한국수력원자력



이창원 수력토건부차장  
한국수력원자력

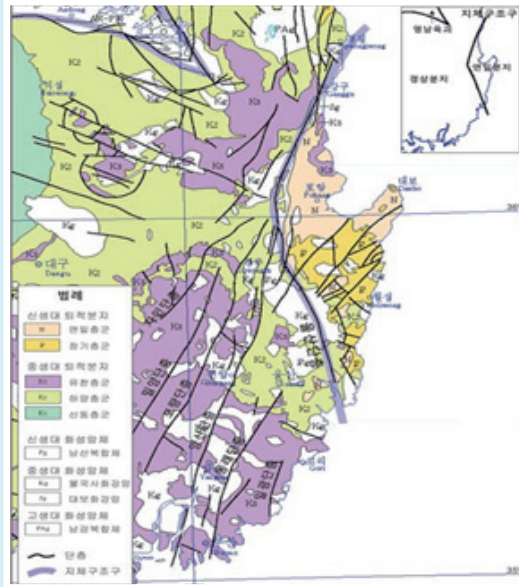
## 1. 배경 및 목적

행정안전부(이하 행안부)는 9.12지진(2016. 9. 12., ML 5.8) 이후 국가 지진방재 개선 대책으로 「한반도 단층구조선의 조사 및 평가기술 개발」 관련 조사 및 연구를 착수하였다. 이 연구는 우리나라에 적용될 수 있는 활성단층 조사 및 평가방법 기준 정립 및 체계화를 통해 조사평가 기술의 표준화를 추진하고 중장기적으로 한반도의 단층지도 작성을 목적으로 한다. 연구기간은 2017년부터 2036년까지 총 4단계(각 단계별 5년)에 걸쳐 수행될 계획에 있으며, 1단계(2017년~2021년) 조사는 9.12지진 및 포항지진(2017. 11. 15., ML 5.4)이 발생 한 제 4기 지각변형이 집중되어 있는 한반도 동남권에 대해 수행되어 2022년도에 완료되었다(참고문헌 1).

정부 주관으로 다부처에서 수행되는 대규모의 단층조사 결과가 발표됨에 따라 원전, 댐, 산업시설 등의 지진안전성의 문제가 대두될 것을 대비하여 조사된 단층에서 발생가능한 지진에 의한 한수원 수력양수댐의 지진안전성을 평가하였다. 즉, 행안부 단층조사를 통해 도출된 조사결과를 바탕으로 단층에서 발생가능한 최대잠재지진 규모를 평가하고, 단층과 근거리에 위치하여 지진 발생 위험도가 비교적 높은 한수원 수력양수댐을 대상으로 단층 모델링과 추계학적 지진동 모사 방법을 통해최대지진동값을 산출하였다. 최대지진동 값은 공학적으로 유효하게 활용되는 부지에서의 최대지반가속도(PGA: Peak Ground Acceleration)를 의미한다.

## 2. 동남권 제4기 단층분절

행안부에서 조사 및 연구 중인 활성단층(active fault)은 지질학적 연대에서 신생대 제4기에 지각의 구조적 활동으로 단층이 형성되거나 재활되었던 단층을 일컫는다. 행안부 1단계(기간: 2017년 ~ 2021년) 조사는 한반도 동남권 지역이 포함되었으며, 총 16개의 단층분절이 신규 확인 또는 재평가되었다. 조사지역에는 북북동-남남서 방향의 양산단층과 북서-남동 방향의 울산단층으로 불리는 큰 단층구조선이 발달하고 있다(그림1). 그림 2는 가동중인 한수원 수력·양수 댐의 위치와 제4기 단층분절 분포도를 나타내고 있다.



[그림 1. 한반도 동남권 지역 지체구조와 단층구조선]



[그림 2. 제4기 단층분절 분포도 및 한수원 수력양수댐 위치]

### 3. 최대잠재지진 규모 평가

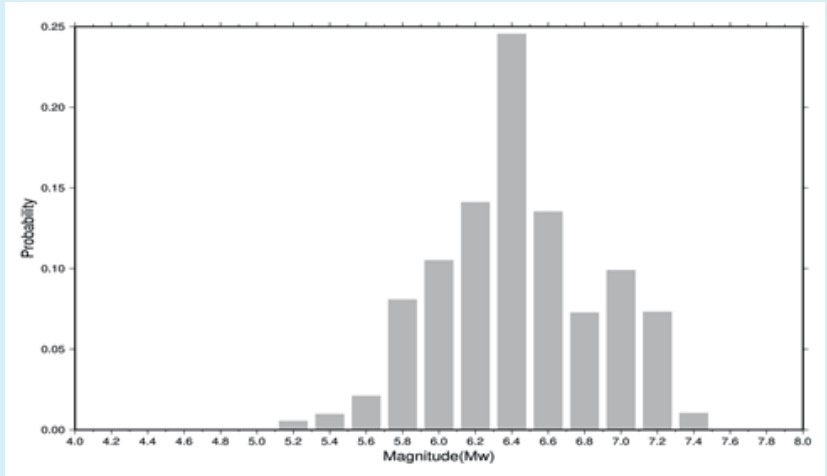
일반적으로 지진관측소에서 기록된 지진 파형의 진폭 크기로부터 규모를 계산하게 되며, 이를 리히터규모(Richter Scale; ML)라고 한다. 하지만, 매우 강한 지진이 지진계에 기록될 경우 진폭이 포화되어 규모 계산이 불가하거나 과소 또는 과대평가 되는 경우가 발생할 수 있어 규모를 계산하는 진폭의 크기에는 제한이 있다. 이러한 문제점을 보완하는 방안으로 모멘트규모(MW)가 사용된다. 모멘트 규모는 다수의 지진 기록 파형 분석으로부터 도출된 지진의 물리적 성질을 기반으로 하며, 규모의 범위는 리히터 규모의 스케일과 유사한 범위를 가지도록 설정 및 변환된다(참고문헌 2).

#### 3.1. 규모 평가 논리수목

자연과학 분야에서 지진과 같은 현상을 분석 및 연구할 때, 그 결과는 연구자 특성 및 가용한 자료에 따라 편차가 발생할 수 있다. 특히, 시기에 따라 연구 및 분석에 접목한 기술적 역량이 고전적이거나 자료가 국한적일 경우 도출 결과에 다소 오류가 포함될 수 있는 지식적 불확실성(epistemic uncertainty)과 시공간적으로 무작위적 특성을 나타내는 무작위적 불확실성(randomness)이 있다. 이러한 불확실성(uncertainty)을 고려하여 정량적이고 공학적인 의미를 가지는 결과를 산출하기 위한 방안으로 논리수목(logic tree)이 제안 되었다. 논리수목은 각 모델(값)과 가중치를 할당하고 신뢰도를 부여하여 평가하는 효과적인 수단이다. 논리수목에서 가지(branch) 마다의 값들은 상호 배타적이어야 하며, 수목의 마디(node)에 모든 가지는 전체포괄적(collectively exhaustive)으로 각 값은 모두 다르며, 하나의 값이 무조건 선정되어야 한다.

#### 3.2. 단층분절 최대잠재지진 규모 산정

최대잠재지진 규모 평가를 수행하기 위한 한반도 동남권 제4기 단층분절의 입력변수는 기 수행된 원전부지에 대한 한반도 동남권 제4기 단층 지진안전성평가 보고서(참고문헌 3)를 참조하였다. 보고서에 따르면 지질분야 전문가 5인은 D(변위)·L(지표단층길이)에 대한 가중치, 최대변위(D), 지표단층길이(L)에 대해 값과 가중치를 제시하였고, 지진분야 전문가 4인은 최대변위를 활용한 규모관계식과 단층길이를 활용한 규모관계식을 각각 제시하고, 가중치를 부여하였다. 논리수목으로 전개하여 계산된 규모와 가중치는 그림3과 같은 확률분포 형태를 나타낸다. 규모값은 최대잠재지진 규모분포에서 가중치를 곱한 평균값을 사용하였다.



[그림 3. 00분절 최대잠재지진 규모 계산 논리수목을 따라 산출된 규모분포예]

## 4. 지진동 예측모델을 활용한 평가

한수원 수력양수 댐 21곳은 그림 2에 나타난 바와 같이 대부분 한반도 중부 및 서남부(경기도, 강원도, 전라도, 충청도) 일대에 위치한다. 한반도 동남권에 집중 분포한 단층분절과 한수원 수력양수댐과의 거리를 무시하고 모든 댐에 대하여 유한단층 모델링을 수행하는 것은 비용과 시간적으로 비효율적이다. 이에 모든 댐에 대한 동남권 제4기 단층의 영향평가는 비교적 간단하지만 정량적인 평가방법인 지진동 예측모델(이하 감쇄식)을 활용하여 최대지반가속도(이하 PGA)를 산출하였다.

### 4.1. 평가방법

지진동 예측모델은 감쇄식이라는 명칭으로 일반적으로 통용되며, 규모와 진앙 또는 진원거리를 인수로 하는 모델(또는 수식)이다. 즉, 지진원의 규모와 관측지점까지의 거리를 알면, 그 지점에서 PGA를 추정할 수 있다. 감쇄식을 활용한 평가를 위해서는 지역적 특성을 고려한 감쇄식 선정 과정이 필요하다. 본 평가에서는 가장 안전성에 민감하고 특수한 내진성능 평가를 수행하는 원전 부지 안전성 평가 시 수행되는 확률론적 지진재해도 분석에 적용한 감쇄식 4개를 채택하였다(참고문헌 4).

감쇄식에 사용된 규모값은 한반도 동남권 제4기 단층분절로부터 수력양수 댐에 영향을 미치는 PGA를 평가하기 위해 3절에서 기술한 최대잠재지진 규모 분포에서 가중치를 고려한 평균이 활용되었다. 즉, 한반도 동남권 제4기 단층분절 중 한수원 수력양수 댐에 영향을 미칠 것으로 판단되는 8개 단층분절(천군, 말방, 차일, 삼남, 월산, 인보, 양산, 유계)의 규모를 계산하고 논리수목 가지 수 만큼 계산된 규모 분포의 값과 가중치를 곱하여 합산한 평균 규모가 사용되었다(표1).

[표 1. 8개 단층분절 평균 규모]

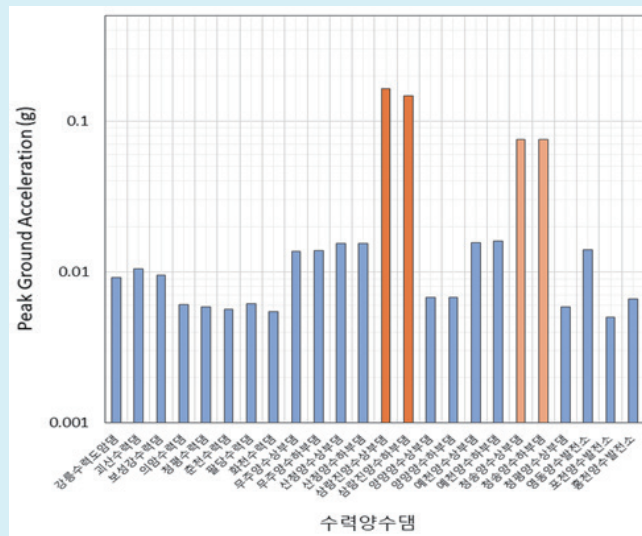
	단층분절명							
	천군	말방	차일	삼남	월산	인보	양산	유계-2
규모	6.21	6.15	6.14	6.43	6.18	6.37	6.24	6.20

### 4.2. 감쇄식에 의한 PGA 평가결과

지진동 예측모델(감쇄식)을 이용한 수력양수 댐 21곳의 PGA 평가결과, 삼남분절에 대한 삼량진 양수 상하부댐 PGA값과, 유계 분절에 대한 청송 양수 상하부댐 PGA값이 상대적으로 높게 평가되어 정밀해석인 EXSIM을 활용해 추계학적 지진동 모사 평가를 수행하기로 결정하였다.(그림 4 참조)

[표 2. 감쇄식에 의한 00댐 최대지반가속도(PGA) 산정예]

댐	분절	최소거리(km)	감쇄식(attenuation model)			
			Junn(2002)	J&B(2003)	GSK2015-[B]	GSK2015-[C]
00댐	천군	204.1	0.007	0.007	0.002	0.003
	말방	210.1	0.006	0.006	0.002	0.002
	차일	226.0	0.006	0.006	0.002	0.002
	삼남	230.6	0.007	0.008	0.002	0.002
	월산	213.2	0.006	0.006	0.002	0.002
	인보	221.1	0.007	0.008	0.002	0.003
	왕산	197.4	0.007	0.008	0.002	0.003
	유계	158.6	0.009	0.009	0.003	0.004



[그림 4. 동남권 제4기 단층 8개 분절 중 수력양수 댐에 미치는 최대 PGA]

## 5. 추계학적 지진동 모사

추계학적 지진동 모사(stochastic ground-motion simulation) 방법은 지진학적 개념을 바탕으로 하여 강지진동을 모사하는 편리하고 접근성이 양호한 방법이며 지진동의 진폭을 가정하여 표현하는 결정론적 방법으로는 강력한 방법이라고 할 수 있다.(참고문헌5,6)

본 평가에서는 근거리 강지진동의 유한단층 모델링이 가능하고, 모서리 주파수와 지진에너지 크기의 관계를 이용한“dynamic corner frequency(동적 모서리 주파수)”를 기반으로 하는 장점이 적용된 전산소프트웨어 EXSIM이 활용되었다.

### 5.1. 속도 단면

삼랑진 양수 상·하부댐, 청송 양수 상·하부댐의 부지응답특성을 확인하고, 부지응답계수를 산출하기 위하여 지질 시추조사를 통해 취득된 속도 단면을 적용하였다.

EL	암 종	Vp(km/s)	Vs(km/s)
EL. 316,6m	토사층	0,838	0,379
EL. 312,6m			
EL. 311,6m			
EL. 310,6m	풍화대층	1,227	0,557
	연암층(CL)	1,456	0,715
	보통암	1,813	0,921
EL. 305,6m	경암층	2,500	1,388
EL. 286,6m			

[그림 5. 삼랑진 양수 상부댐 추정 속도 단면]

EL	암 종	Vp(km/s)	Vs(km/s)
EL. -6,80m	토사층	0,838	0,379
EL. -19,55m			
	풍화대층	1,227	0,557
EL. -39,55m	연암층(CL)	1,456	0,715
EL. -42,55m	연암층(CM)	1,456	0,715
EL. -46,55m	보통암	1,813	0,921
EL. -51,55m	경암층	2,500	1,388
EL. -81,55m			

[그림 6. 삼랑진 양수 하부댐 추정 속도 단면]

EL	암 종	Vp(km/s)	Vs(km/s)
EL. 504,7m	토사층	0,770	0,334
EL. 504,3m			
EL. 502,8m			
EL. 501,8m	풍화대층	1,404	0,716
	연암층(CL)	1,502	0,773
	연암층(CM)	1,705	0,904
EL. 499,7m	보통암	1,990	1,095
EL. 496,4m	경암층	3,100	1,721
EL. 474,7m			

[그림 7. 청송 양수 상부댐 추정 속도 단면]

EL	암 종	Vp(km/s)	Vs(km/s)
EL. 209,5m	토사층	0,770	0,334
EL. 200,0m			
EL. 196,9m	풍화대층	1,404	0,716
	연암층(CL)	1,502	0,773
EL. 190,0m	연암층(CM)	1,705	0,904
EL. 183,2m	보통암	1,990	1,095
EL. 178,2m	경암층	3,100	1,388
EL. 148,2m			

[그림 8. 청송 양수 하부댐 추정 속도 단면]

## 5.2. 단층분절 EXSIM 평가 논리수목

전문가 자문을 통해 취합된 삼남분절과 유계분절에 대한 입력변수 논리수목은 다음과 같다. 삼남분절, 유계분절의 규모별 파열면적과 주향, 경사, 와지진분야 전문가별 에너지방출 최소값이 및 응력강하량을 논리수목으로 전개하면 총 논리수목 가지수는 각각 15,015개, 5,940개이다(그림 9).

규모(Mw)	규모-면적 관계식	주향(°)	경사(°)	지진 전문가	에너지방출 최소깊이 (km)	응력강하량 (bar)
5.2					5	70
0.00552					0.2	0.3
5.4						
0.00969				A	7.5	100
5.6	W&C (1994)_All			0.25	0.5	0.5
0.02106	0.4625				12.5	150
5.8	W&C (1994)_R				0.3	0.2
0.0808066	0.1				4	50
6.0					0.2	0.4
0.105118	W&C (1994)_SS		35.00	B	5	70
6.2	0.15		0.06	0.25	0.6	0.4
0.141183			50.00			
6.4	Brengman (2019)_All	020	0.06		6	126
0.245526	0.1	1.0	60.00		0.2	0.2
6.6			0.04			20
0.135341	CEUS (2011)		73.00			0.6
6.8	0.0625		0.12	C	5	30
0.0727014	Leonard (2014)		84.00	0.25	0.7	0.3
7.0	0.0625		0.72		10	0.3
0.0990806					0.3	50
7.2	PEER (2010)					0.1
0.073223	0.0625				3	30
7.4					0.2	0.2
0.0104304				D	4	50
7.6				0.25	0.2	0.5
0.00032					5	100
					0.6	0.3

[그림 9. 삼남분절 최대지반가속도 평가 논리수목예]

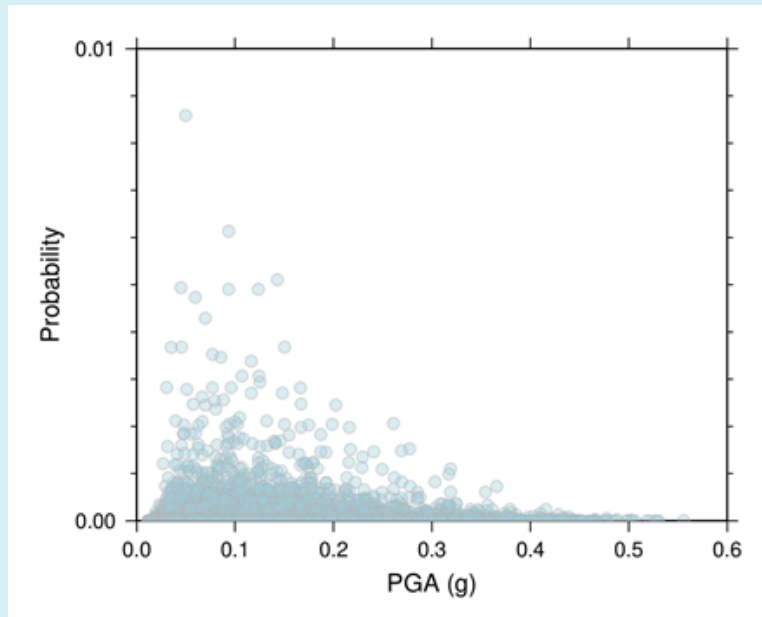
## 6. 단층분절에 대한 추계학적 지진동 모사

### 6.1. 지진동 모사 결과

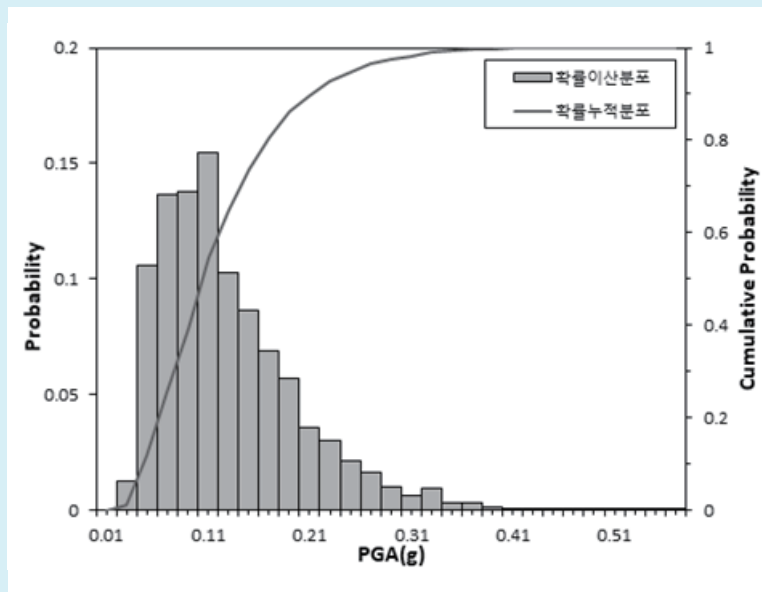
삼남분절에 의한 삼량진 양수 상-하부담의 PGA를 산출하기 위한 논리수목의 개수는 총 15,015가지이다. 즉, 15,015가지의 입력 변수 경우의 수 조합이 EXSIM의 입력값으로 적용되어 계산이 수차례 반복되었다. 이러한 반복적 계산 과정을 통해 도출된 PGA의

분포도를 도시하면, 그림 10과 같은 형태를 나타낸다. 이와 더불어, 일정한 구간(bin)으로 나눠 그 구간 내에 포함하는 값의 가중치(확률)를 합산하여 표현한 이산확률분포와 누적확률분포를 도시하면 그림 11과 같다.

위와 같은 확률분포로부터 논리수목별 가중치(확률)와 PGA 값을 고려한 평균값산정을 통해 삼랑진 양수 상부댐의 PGA 값은 약 0.119g가 산출되었고, 같은 방법삼랑진 양수 하부댐은 약 0.112g, 청송양수 상하부댐은 각각 0.102g, 0.081g의 PGA값이 산출되었다.



[그림 10. 논리수목 가지 수 크기만큼 삼남분절에 대한 삼랑진 양수 상부댐의 PGA 분포예]



[그림 11. 삼남분절에 대한 삼랑진 양수 상부댐의 PGA 확률 이산 및 누적 분포예]

## 7. 결론

본 평가는 2022년 행안부 주관으로 수행된 다부처 지진단층 공동사업(참고문헌 1)으로 도출된 한반도 동남권(1단계 지역) 제4기 단층분절에 대하여 최대잠재지진 규모를 평가하고, 이에 의한 한국수력원자력(주)(이하 한수원)에서 운용중인 수력양수 댐 부지에 미치는 최대지반가속도(PGA)를 평가하여 단층분절 최대잠재지진에 의한 안전성을 확인하고자 수행되었다.

대부분의 한수원에서 운용하는 수력양수 댐은 우리나라 전역에 위치하고 있으나, 대부분한반도 중부 또는 남서부(경기도 북부 및 강원도 일대)에 분포하고 있으므로 한반도 동남권 제4기 단층분절로부터 이격거리가 비교적 큰 편이다. 평가에 포함된 수력양수 댐에는 운용중인 21개 댐을 대상으로 한반도에 적용가능한 지진동 감쇄모델(감쇄식)을 활용하여 최대지반가속도(PGA)를 산출하였다. 대부분의 수력양수 댐에서 한반도 동남권 제4기 단층분절 최대잠재지진에 의한 PGA가 0.1g 이하 수준으로 평가된 반면, 삼랑진 양수댐(상·하부)은 삼남분절에 의해 0.1g를 초과하는 결과가 산출되었다. 이와 더불어, 청송 양수댐(상·하부)에 대해 유계분절에 의한 PGA가 차순으로 높은 편이어서 인근 단층분절에 비교적 가까운 4개 양수댐에 대해 추계학적 지진동 모사 방법이 탑재된 전산소프트웨어 EXSIM을 활용하여 최대지반가속도(PGA)를 평가하고, 이에 대한 결과를 분석하였다. EXSIM을 활용하여 삼남분절에 의한 삼랑진 양수댐(상·하부) PGA 및 유계분절에 의한 청송 양수댐(상·하부) PGA를 평가한 결과는 아래 표3과 같다.

[표 3. 제4기 단층분절에 의한 삼랑진 및 청송 양수댐에서 최대지반가속도(PGA)]

수력양수댐		제4기 단층분절		이격거리
		삼남분절	유계분절	
삼랑진	상부	0.119g	-	(삼남) 약 21.3km
	하부	0.112g	-	(삼남) 약 21.3km
청송	상부	-	0.102g	(유계) 약 31.8km
	하부	-	0.081g	(유계) 약 31.8km

4곳의 부지에서 산출된 PGA는 0.1g에 가깝게 계산되었으며, 삼랑진 및 청송 양수댐에 적용된 설계기준지진 0.154g 이하로 도출되어 제4기 단층분절의 최대잠재지진에 의한 영향이 크지 않은 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- 1. 행정안전부, 2022, 한반도 단층구조선의 조사 및 평가기술 개발.
- 2. USGS, website, Earthquake Magnitude, Energy Release, and Shaking Intensity.
- 3. 한국수력원자력(주), 2023, 동남권 제4기 단층을 반영한 원전부지 지진안전성평가 보고서.
- 4. 한국수력원자력(주), 2024, 동남권 제4기 단층을 반영한 월성, 고리/새울, 한빛, 한울 부지 확률론적 지진재해도 분석 보고서.
- 5. IAEA, 2015, Ground Motion Simulation Based on Fault Rupture Modelling for Seismic Hazard Assessment in Site Evaluation for Nuclear Installations, Safety Reports Series, No. 85.
- 6. Somerville, P., "Seismic Hazard Evaluation"(Proc. 12th World Conf. Earthquake Engineering, Auckland, 2000) Paper No. 2833.