

원자력 발전소 내진설계 시 적용하는  
설계지진동과 입력지진동 설정에 따른  
기술적 고찰

(주)에코닝  
○김희균, 황기태, 송성빈

# 연구 배경 및 목적

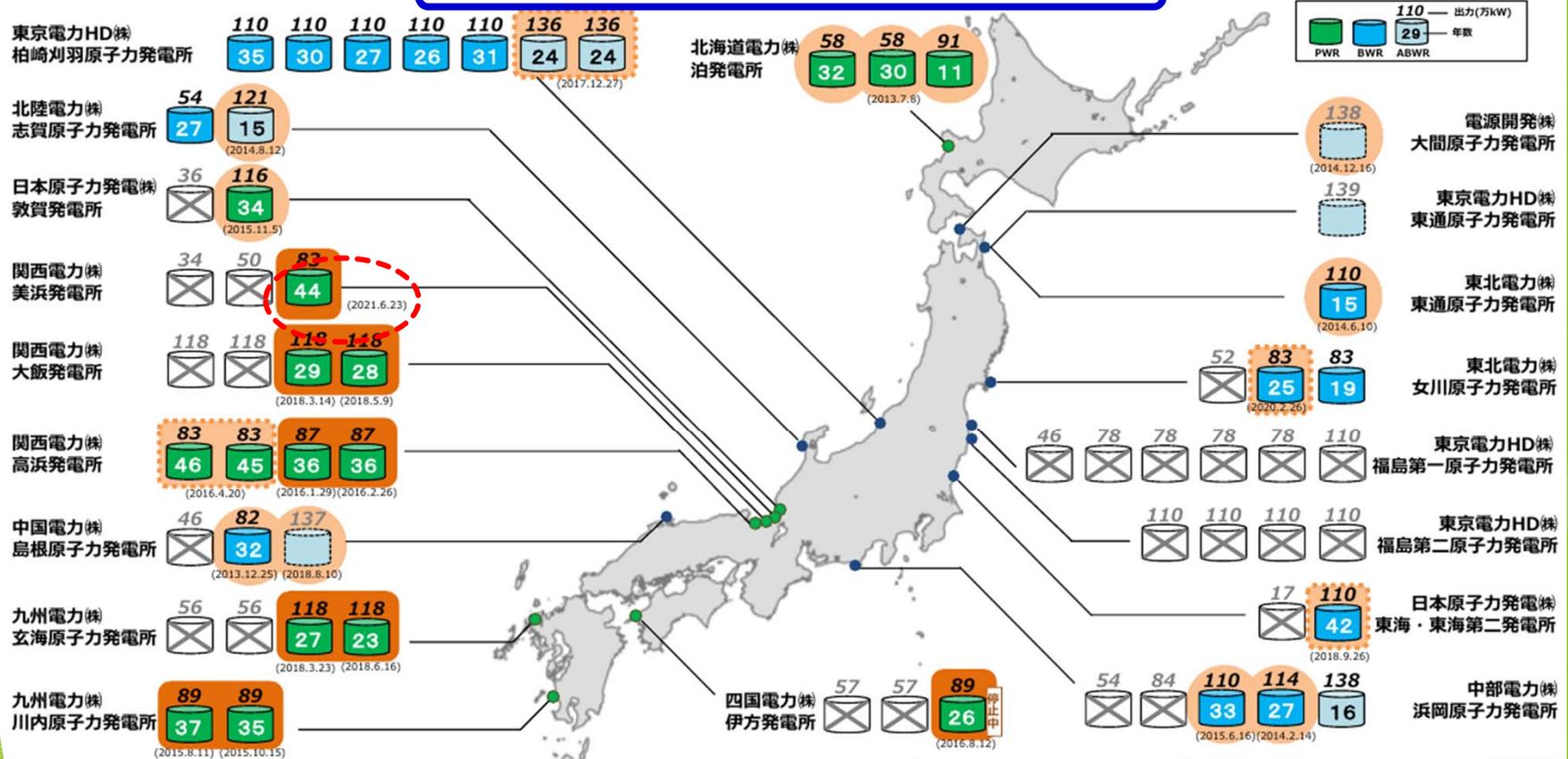
- 2011년 동일본대지진(3.11)의 발생은 국내에서의 지진에 대한 경각심을 주었고, 2016년 경주지진과 2019년 포항지진의 영향으로 국내 원자력발전소에 대해서 설계초과지진동에 대한 안전성 검토가 요구되고 있다.
- 국내원전의 **설계지진동**은 이제까지 0.2G로 설정하였으나, 신고리3, 4호기와 신울진1, 2호기는 0.3G를 적용하고, 부지응답해석을 통해 입력지진동을 설정하였다.
- 경주지진 이후 활성단층 조사가 진행되고 있고, 원전부지에 영향을 주는 새로운 활성단층이 발견될 경우에는 원전안전성 문제로 귀결되어 설계초과지진동 설정에 대해 논의가 필요할 것으로 예상된다.
- 기존 원자력발전소의 안전성평가를 위한 **기준지진동**과 **입력지진동**의 설정에 관하여 명확히 하여 원전구조물에 대한 입력지진동이 과도하게 커질 우려성을 방지할 필요가 있다.
- 내진설계 수준을 상향한다는 명목의 입력레벨 상향은, 지반 증폭에 의한 **설계지진동**의 상향으로 구조물 응답에 의한 층응답가속도의 상승을 가져오고, 이는 구조물 뿐만 아니라 설비 및 기기의 안전성 검토에도 영향을 미치게 되며, 평가 결과에 따라서는 내진안전성을 충족시키지 못할 우려성이 있다.
- 본 연구에서는 지진동에 대한 명확한 설정을 통해, 설계지진동 작성 프로세스를 비교 검토할 필요성에 대해 분석 및 고찰하였다.

# 연구 배경 및 목적

- 2011년 3월11일 발생한 동일본지진은 쓰나미발생을 동반하여 Fukushima 원전은 방사선누출 사고로 폐로가 결정, 그 외의 원전에 대해서도 폐로·재가동, 신규제기준 심사 등을 실시중.



## 일본의 원자력발전소 현황(2021.7. 5 시점)



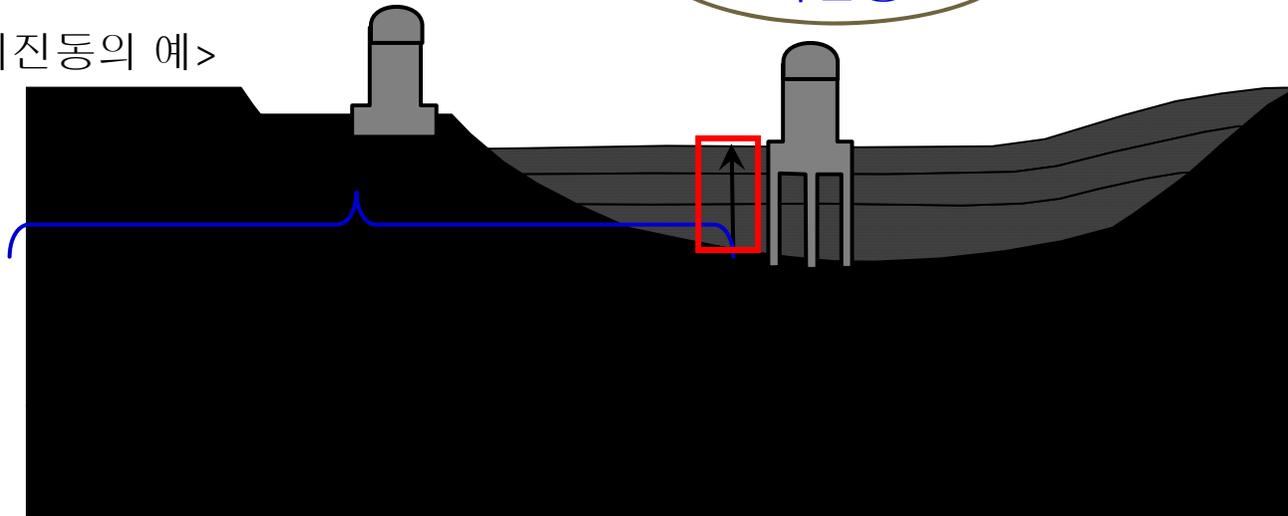
# 일본의 지진발생과 기술기준

발생연도	피해상황	내진기준
1924년		시가지건축물법 개정, 내진설계규정 최초 도입
1981년		<b>건축법시행령 대 개정(신 내진설계기준)</b> • 1차설계(허용응력도), 2차설계(탄소성해석)도입 • 내진설계기준 대폭개정(현재 신 내진설계기준) • 신기준 적용 구조물은 고베지진(1995)시 피해가 거의 없어 내진설계법의 효용성이 확인됨. 보유수평내력 산정법 등 도입 • <b>발전용 원자로시설에 관한 내진설계 심사지침 개정, 정적지진력 산정법 수정</b> , 새로운 지식과 경험 수정반영
1995년	한신아와지진(M7.2)	건축기준법 개정, 접합부 내진설계 KOBE지진을 고려한 "원자력시설 내진안전성 검토회 보고서" 에서 "원자력시설의 내진설계 규정하는 관련지침류에 대해서 KOBE를 고려하여도 타당성이 있다는 것을 확인"
2000년	도토리세이부지진(M7.3)	건축기준법 시행령 대 개정, 성능설계법 도입
2005년	미야기현지진(M7.2)	<b>Onagawa 원자력발전소 설계기준지진동 상회</b>
2006년		<b>발전용 원자로시설에 관한 내진심사 지침개정</b> (신 내진설계 심사지침) 지진학 및 공학적 새로운 지식과 경험 축적으로 전면적인 개정 사업자에 <b>신 내진설계 심사지침에 따른 내진 안전성평가</b> 지시
2007년	노토한토지진(M6.9)	<b>Siga 원자력발전소 설계기준지진동 상회</b>
2007년	니가타현주에츠지진(M6.8)	<b>Kashiwazakigariwa 원자력발전소 설계기준지진동 상회</b>
2008년		<b>기술기준 및 지침 개정(JEAC(G)4601-2008)</b>
2009년	Surugawan지진(M6.5)	<b>Hamaoka 원자력발전소 설계기준지진동 상회</b>
2011년	동일본대지진(M9.0)	Onagawa 원자력발전소, Fukushima 제1원자력발전소 Fukushima 제2원자력발전소, Tokai 제2발전소 <b>설계기준지진동 상회</b>
2015년		<b>기술기준 및 지침 개정(JEAC(G)4601-2015) 및 신 규제기준 제정</b>
2020년		4기의 원자력발전소가 신규제기준에 따른 내진 안전성평가 후 재가동 중이고, 11기가 적합성 심사 중

# 지진동에 관한 여러 명칭



<입력지진동의 예>



상)

# 기준지진동 $S_s$ , 설계용 입력지진동

## 기준지진동 $S_s$ (JEAG4601-2015)

부지 및 부지 주변의 지질·지질구조에 따른 지진활동성 등의 지진학 및 지진공학적 견지에서 시설의 사용기간 중에 매우 드물게 발생할 가능성이 있고, 시설에 큰 영향을 미칠 우려성이 있다고 예상하는 것이 적절하다고 책정한 지진동

## 설계용 입력지진동(일본의 경우)

설계용 입력지진동	설 명
고시파	2000년 건설성고시 제 1461호 제4의 규정에 따라 해방공학적이반에서의 가속도 응답스펙트럼에 적합한 지진파
사이트파	고시 제4호에 따라, 건설예정지의 내륙직하형지진, 플레이트경계형지진 등을 평가하고, 단층파괴모델이나 지반구조에 기초해 작성한 건설지의 모의지진파
장주기지진동에 대한 대책시안	「초고층건축물 등에서의 남해트로프옆의 거대지진에 의한 장주기지진동 대책에 대해」(2016. 6. 24) 국토교통성 주택국건축지도과장, 국주지(国住指)제1111호에 기초한 것.

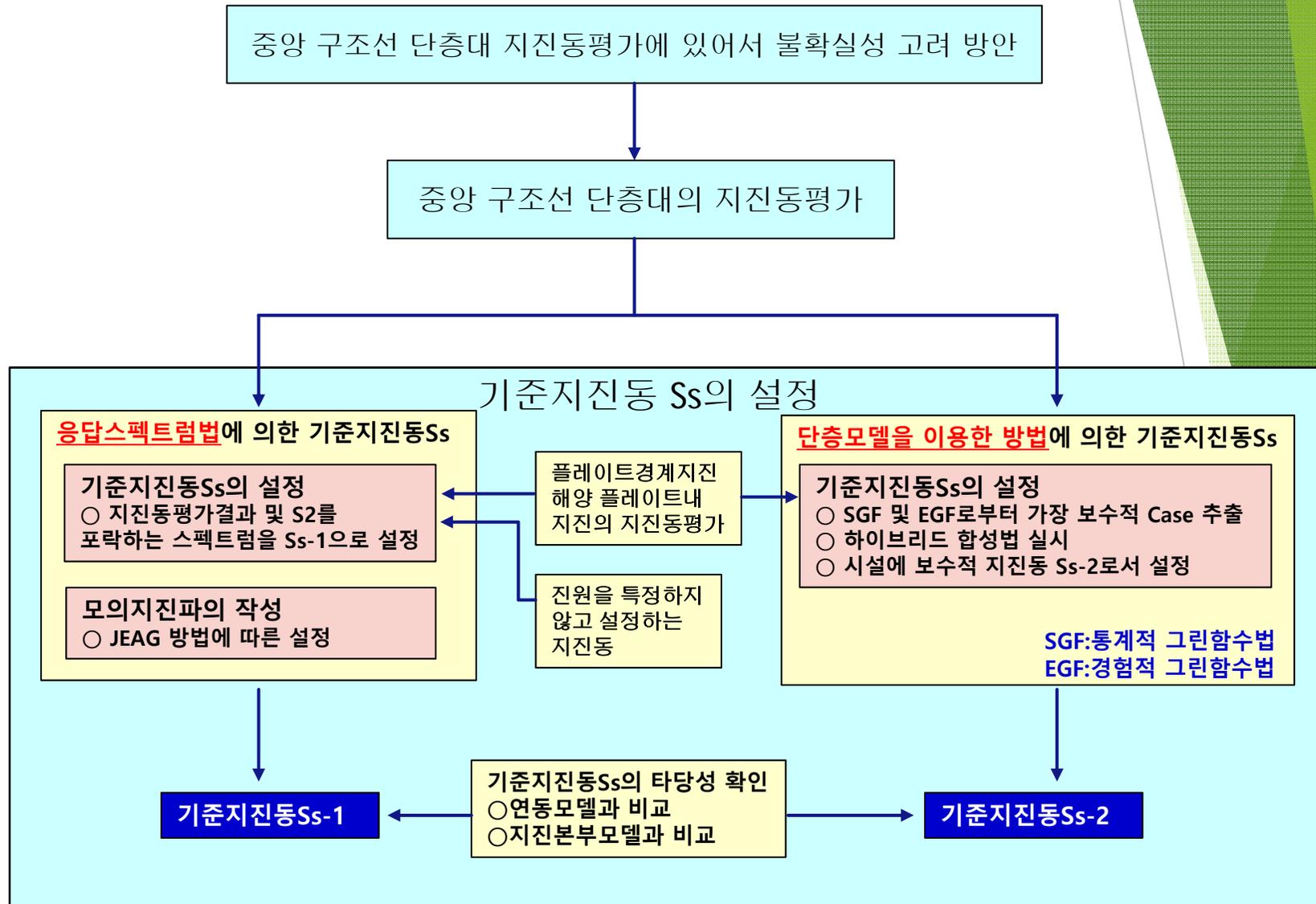
# 지진동 작성방법 및 종류

## 대표적 지진동 작성방법 및 종류(일본의 경우)

Site파 작성방법 (지진동 작성)	대표적 방법	특징
거리 감쇠식에 단층의 확대효과를 고려한 방법	Midorikawa•Kobayashi 방법	단층 진원모델을 설정하여 파괴 전파에 따른 단위영역에서 파의 무리가 순차적으로 발생한다고 생각됨.
반경험적 방법	통계적 Green함수법 경험적 Green함수법	경험적 Green함수법은 건설지에서 중소지진의 기록을 얻을 수 있는 경우에 한함.
이론적 방법	유한 요소법 유한 차분법 등	약간 장주기의 지진동이 대상이 됨.
Hybrid 법	반경험적 방법과 이론적방법을 중첩하는 방법	단주기에서 장주기까지의 지진동을 포함.

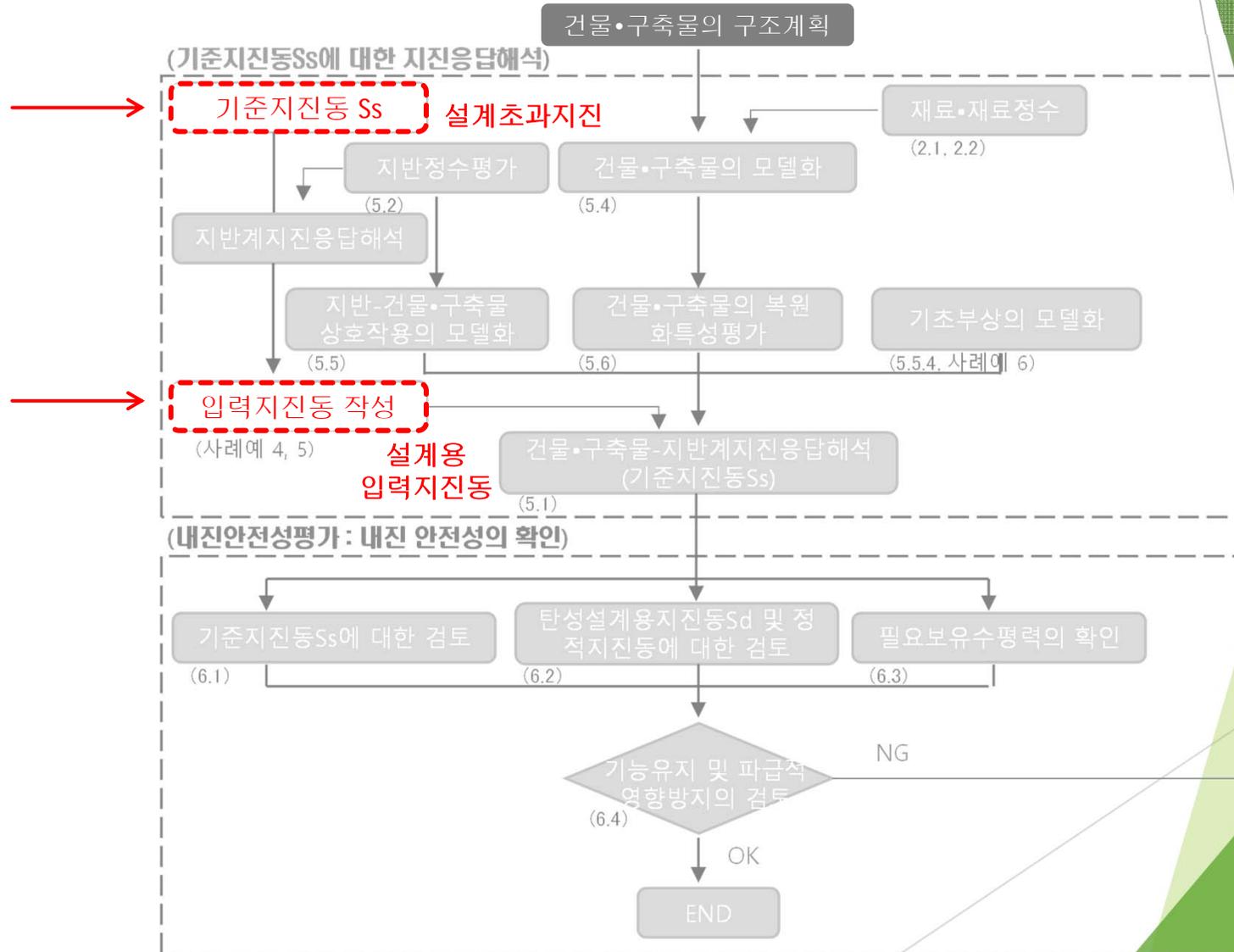
# 기준지진동Ss 설정 Flow

부지에 미치는 영향이 큰 중앙 구조선 단층대를 중심으로 구성



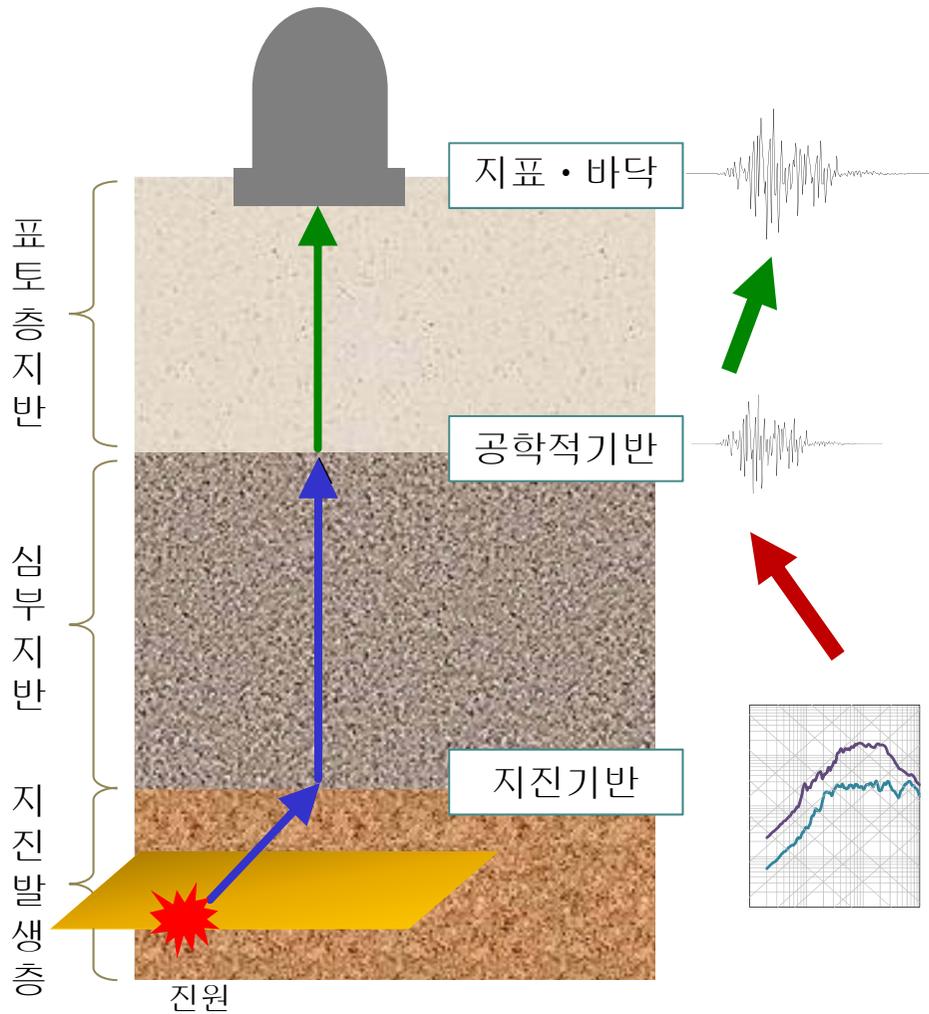
# 설계초과지진(기준지진동 $S_s$ )에 대한 평가 Flow

## 원자력발전소 내진설계 기술규정(JEAC4601-2015)



# 설계용 입력지진동 작성

## 지진발생에서 설계용 입력지진동 작성까지



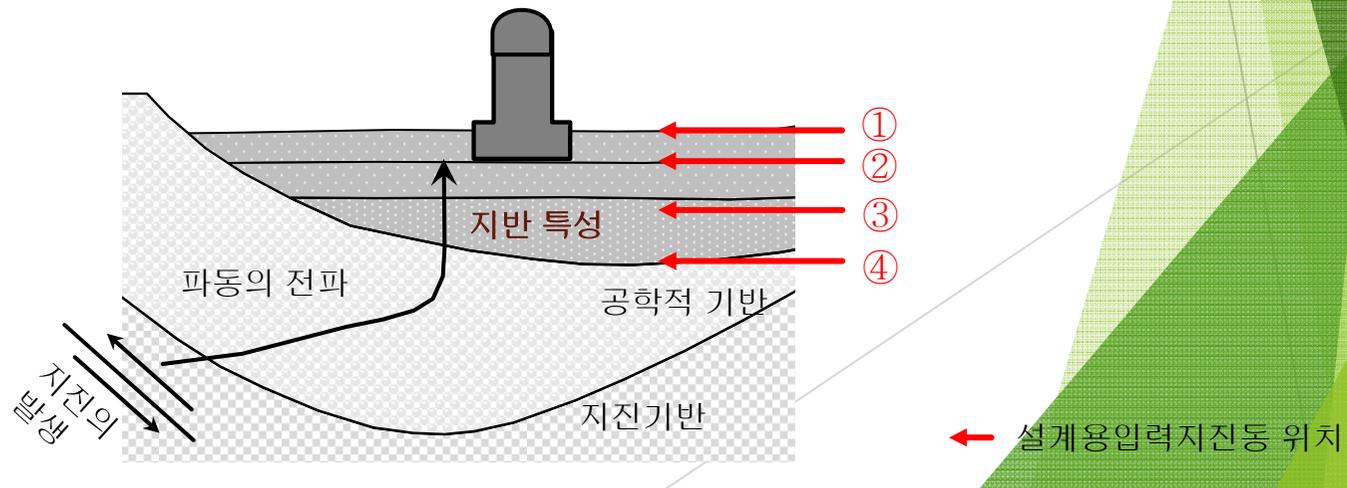
공학적이반면위의 지진파로 건물  
입력위치의 지진파를 작성  
• 표토층 지반모델 설정

응답스펙트럼에 적합한 시간이력  
파형을 작성  
• 진폭특성 설정  
• 위상특성 설정

공학적이반면에서의 응답스펙트럼  
작성  
• 건설지주변에서의 지진피해조사  
• 단층모델 설정  
• 심부지반 모델 설정

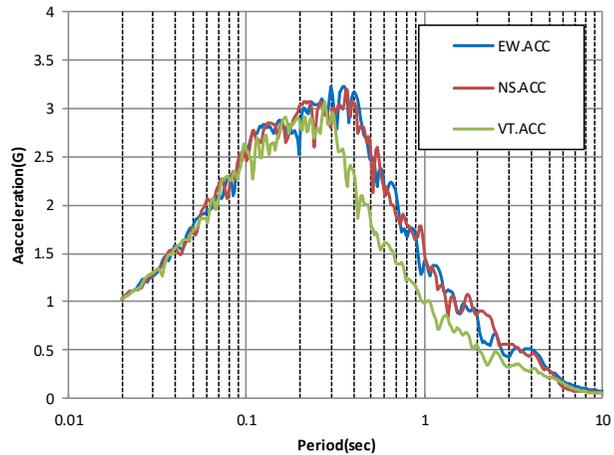
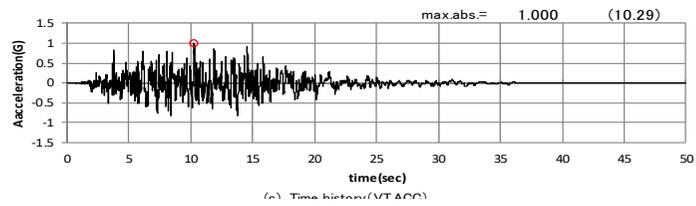
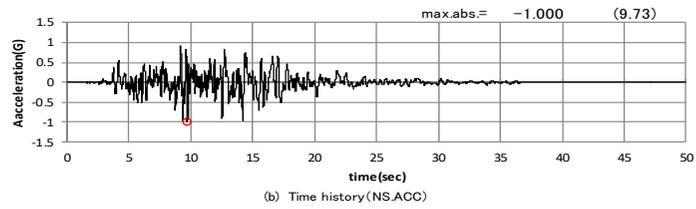
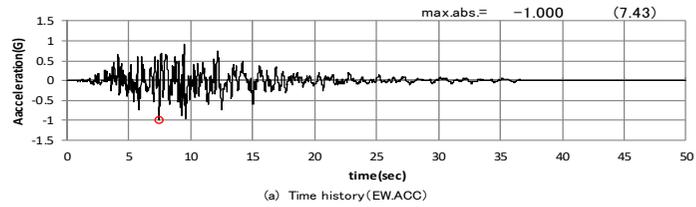
# 지진동 입력레벨

- ▶ 국내원전의 설계초과지진동 크기  
0.2G⇒ 0.3G(신고리3, 4호기, 신울진1, 2호기 적용)로 상향(단순히 1.5배)
- ▶ 해당 건물 지반의 위치③(①)에 기준지진동을 입력하여 지반응답해석을 실시, ②의 위치의 설계용 입력지진동을 산정, 상부구조물의 설계 및 내진안전성 검토를 실시하게 된다.
- ▶ 국내에서는 견고한 지반의 영향으로 위치①~ ④의 지진동 입력레벨에 의한 응력은 지진동 크기에 따라 차이가 발생한다.
- ▶ 설계초과지진동 0.2G, 0.3G의 기준이 되는 위치와 지반의 영향을 받는 기준지진동과 설계용 입력지진동의 설정 위치에 대한 명확한 이해와 설정이 중요하다.

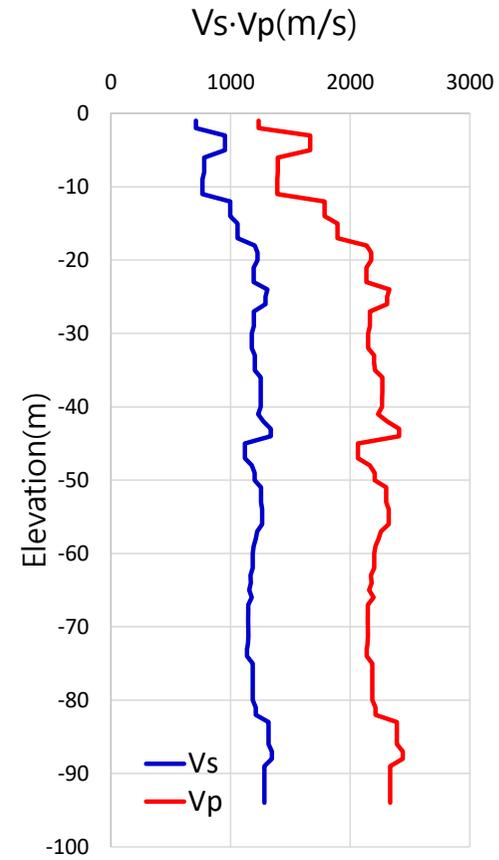


# 지반응답해석\_개요

## 기준지진동



## 지반모델



## 지진동크기

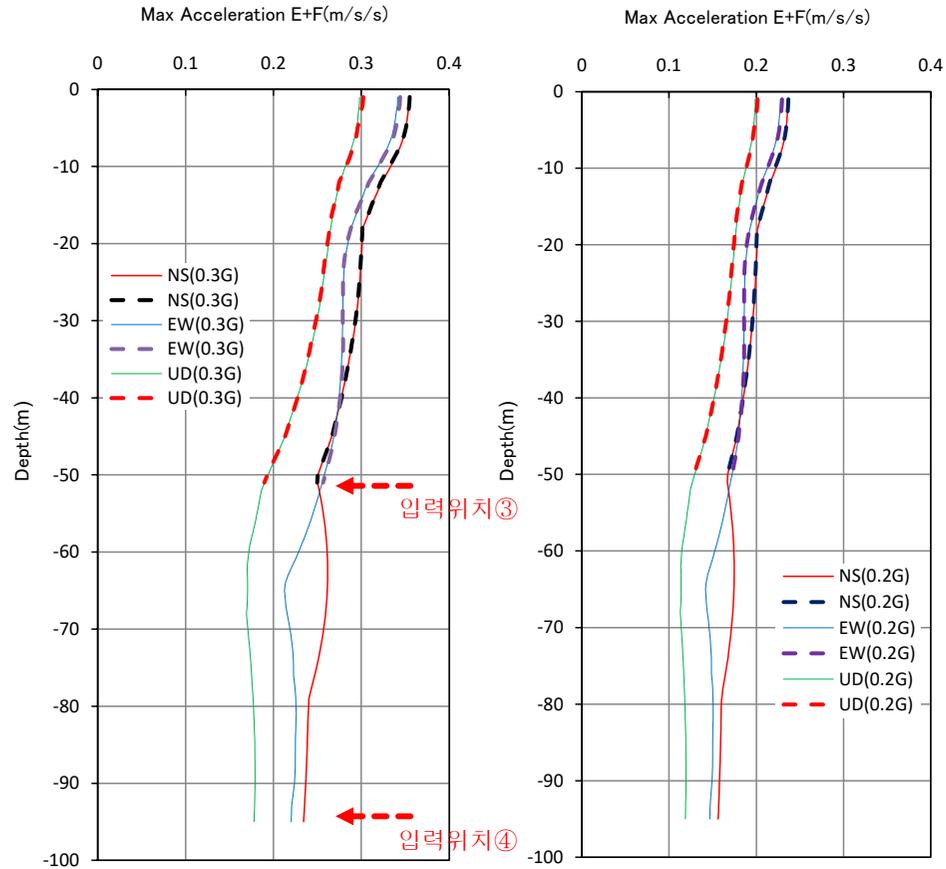
지진동 크기 : 0.1G, 0.2G, 0.3G, 0.4G

# 지반응답해석\_결과

## 입력위치에 따른 응답 비교

최대가속도(등가선형해석 결과)

— : 입력위치④  
- - - : 입력위치③



E+F(입력위치③)						
Acc(m/s <sup>2</sup> )						
위치	NS (0.3G)	증폭비	EW (0.3G)	증폭비	UD (0.3G)	증폭비
지표면	0.355	1.42	0.344	1.34	0.302	1.59
기반면	0.250		0.257		0.189	
위치	NS (0.2G)	증폭비	EW (0.2G)	증폭비	UD (0.2G)	증폭비
지표면	0.237	1.42	0.230	1.34	0.202	1.60
기반면	0.166		0.171		0.126	

E+F(입력위치④)						
Acc(m/s <sup>2</sup> )						
위치	NS (0.3G)	증폭비	EW (0.3G)	증폭비	UD (0.3G)	증폭비
지표면	0.355	1.51	0.341	1.55	0.298	1.67
기반면	0.234		0.220		0.178	
위치	NS (0.2G)	증폭비	EW (0.2G)	증폭비	UD (0.2G)	증폭비
지표면	0.237	1.51	0.228	1.55	0.199	1.68
기반면	0.156		0.147		0.119	

입력위치에 따른 지표면 최대가속도 차이

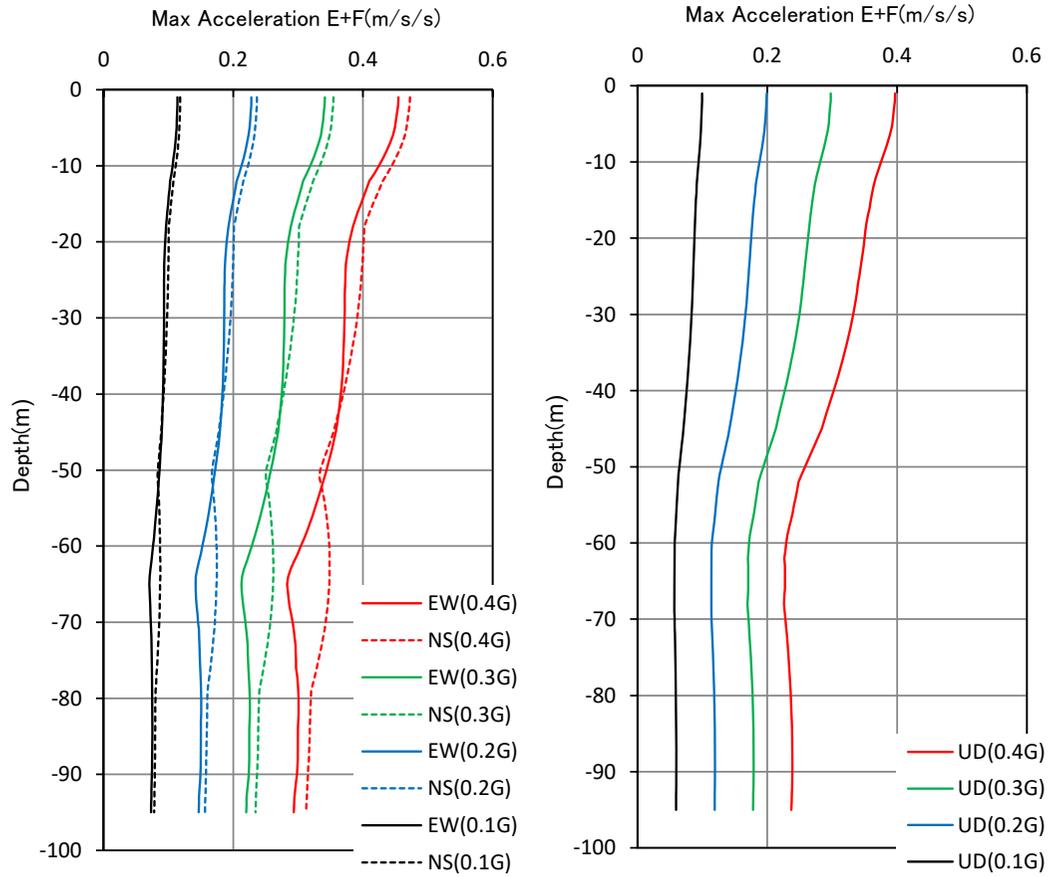
	0.3G	0.2G
NS	0.1%	0.1%
EW	0.8%	0.7%
UD	1.4%	1.4%

• 지진동의 입력위치에 따른 응답결과는 지진동의 특성 및 지반 특성을 고려해야한다.

# 지반응답해석\_결과

## 지진동 크기에 따른 응답 비교

## 최대가속도(등가선형해석 결과)



위치	Acc(m/s <sup>2</sup> )					
	NS (0.4G)	증폭비	EW (0.4G)	증폭비	UD (0.4G)	증폭비
지표면	0.472	1.51	0.455	1.55	0.397	1.67
기반면	0.312		0.293		0.237	
위치	Acc(m/s <sup>2</sup> )					
	NS (0.3G)	증폭비	EW (0.3G)	증폭비	UD (0.3G)	증폭비
지표면	0.355	1.51	0.341	1.55	0.298	1.67
기반면	0.234		0.220		0.178	
위치	Acc(m/s <sup>2</sup> )					
	NS (0.2G)	증폭비	EW (0.2G)	증폭비	UD (0.2G)	증폭비
지표면	0.237	1.51	0.228	1.55	0.199	1.68
기반면	0.156		0.147		0.119	
위치	Acc(m/s <sup>2</sup> )					
	NS (0.1G)	증폭비	EW (0.1G)	증폭비	UD (0.1G)	증폭비
지표면	0.118	1.51	0.114	1.55	0.099	1.68
기반면	0.078		0.073		0.059	

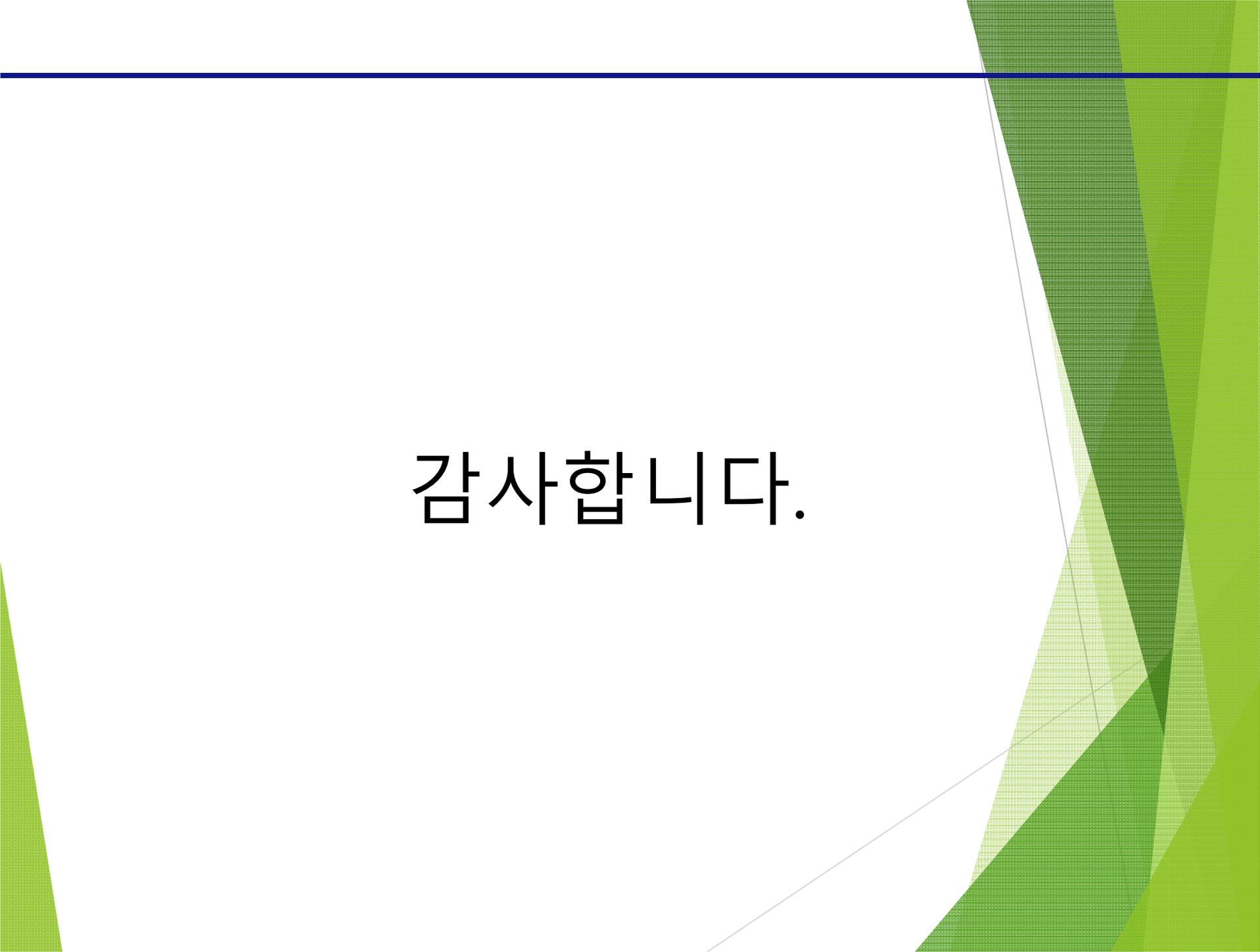
• 지진동의 크기에 따른 응답결과는 지진동이 클수록 지반의 영향이 크게 작용한다.

## 맺음말

- 지금까지의 설계용 지진동의 크기는 지반의 영향을 크게 받지않는 규모였으나, 초과지진동의 상향으로 인해 지반의 특성을 고려한 검토가 필요하다.
- 초과지진동의 상향은 설계용 지진동의 상향으로 상부구조물에 미치는 영향도 커진다.
- 설계초과 지진동(기준지진동)과 설계용 입력지진동을 명확히 구분하여 지반의 영향을 고려한 지진동 산정이 필요할 것으로 판단되며, 지반의 영향과 상부구조물에 미치는 영향을 고려하여 설정해야 한다.
- 상부구조물의 설계 및 내진안전성 검토를 위한 설계용 입력지진동 산정 및 설정에 대해 유의하여 적용해야 한다.

---

감사합니다.

The slide features a white background with a dark blue horizontal line near the top. On the right side, there is a large, abstract graphic composed of several overlapping, semi-transparent green shapes in various shades, including a dark green, a medium green, and a light green. On the left side, there is a smaller, solid green triangular shape pointing upwards.