

원전 기초지반의 지진안정성 평가 모델 연구

The Study on Seismic Stability Evaluation Model for Rock Foundation of Nuclear Power Plant

황 성 춘*
Hwang, Seong-Chun

장 정 범**
Jang, Jung-Bum

국문요약

본 연구의 목적은 국내 실정에 적합한 원전 기초지반의 지진안정성을 평가할 수 있는 적절한 해석모델을 제시하는 것이다. 입력지진의 작용방향, 경계조건, 해석 모델의 폭 및 깊이, 단층연약대의 모델링방법 등의 해석조건에 대하여 활동면해석법, 등가정적해석법, 동적해석법을 적용하였다. 해석결과 측면경계조건은 등가정적 해석시 수평롤러, 동적해석시 전달경계, 해석영역의 폭은 구조물 폭의 5배 이상, 깊이는 구조물 폭의 2배이상을 적용하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

주요어 : 활동면해석, 등가정적해석, 동적해석, 불연속면, 단층연약대

ABSTRACT

The purpose of this study is to suggest a proper analysis model that can evaluate seismic stability for local rock foundation of nuclear power plant. Sliding Analysis, Pseudo-static Analysis and Dynamic Analysis methods are used for analysing NPP rock foundation with the conditions like acting directions of input earthquake, boundary conditions, width and depth of analysing model, and modeling methods of weakness fault zones. As the results of study, Pseudo-static Analysis for lateral roller and dynamic analysis for transfer boundary condition showed good results, and analysing ranges of width and depth were 5 times of structure width and over 2 times of structure depth.

Key words : sliding analysis, pseudo-static analysis, dynamic analysis, discontinuity, fault zone

1. 서 론

원전건설시 사전에 정확하고 충분한 부지조사를 통해 최대한 단층연약대를 피하도록 원전 구조물을 배치, 설계하고 있으나 부지규모상 단층연약대가 전혀 없는 곳에 원전을 건설하는 것은 매우 힘든 상황이다.⁽¹⁾ 국내에서도 원전 건설 예정부지에 단층연약대가 존재할 수 있는 개연성이 상존함에 따라 단층연약대 등 원전 기초지반에 존재하는 불연속면을 고려한 기초지반의 지진안정성 평가는 불가피하게 수행될 전망이다. 현재 국내에서도 원전 기초지반 내 단층연약대가 존재하는 경우 지진하중으로 인한 기초지반의 활동안정성에 대한 연구가 활발히 진행중이나, 체계화된 평가절차에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 특히, 활동면해석, 등가정적해석, 동적해석과 같은 해석방법에 의하여 원전 기초지반의 지진안정성을 정확히 평가하기 위해서는 해석방법에 따라 적절한 해석조건을 적용하여야 한다.⁽²⁾ 따라서, 본 연구에서는 활동면해석, 등가정적해석, 동적해석에 의하여 국내 실정에 적합한 원전 기초지반의 지진안정성을 평가할 수 있는 적절한 해석모델을 제시하기 위하여 가상의 원전 기초지반에 대해 각 단계별로 다양한 해석조건을 부여하여 지진안정성 평가를

실시하였고, 그 결과를 상호·비교하여 합리적인 해석모델을 제시하고자 한다.

2. 지진 안전성 평가절차

일본의 경우 지체구조 상 활성단층이 전국적으로 분포하고 있고, 대규모의 지진이 빈번하게 발생하고 있기 때문에 원전기초지반 내 단층 연약대가 존재하는 경우 지진하중에 대한 기초지반의 활동안정성을 평가하도록 규제기준이 수립되어 있고 이를 위한 해석기법 및 평가절차가 체계화되어 있다.⁽³⁾ 일본에서는 원전의 기초지반에 단층연약대가 존재하는 경우 기초지반의 지진안정성 평가항목으로서 지반지지력, 침하와 활동안정성을 평가하고 있다. 또한, 지진안정성 평가를 위하여 지질 및 기초지반조사, 다양한 실내시험 등을 수행하고 그 결과에 따라 단층연약대 등 불연속면의 거동을 정확하게 모사할 수 있는 기초지반모델을 작성하여 해석을 수행한다. 이때 사용되는 해석방법으로는 활동면해석(관용법), 정적해석과 동적해석 등 3 가지가 있으며, 이들 해석기술은 요구되는 지진안정성 평가결과의 정확도에 따라 Level 1, 2, 3의 3 단계로 구분되어 적용된다. 이와 같이 일본에서는 원전 기초지반의 지진안정성 평가에 대한 연구가 많이 수행되어 체계화된 평가절차 및 관련 해석기술들을 갖추고 있으며, 현재는 해석모델의 신뢰성을 향상시키는 기술개발에 주력하고 있다.⁽³⁾

* 정희원 · 경주대학교 건설환경공학부 조교수, 공학박사
(대표저자: yeons@kyongju.ac.kr)

** 정희원 · 한전 전력연구원 책임연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2005년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일: 2005. 3. 11 / 심사종료일: 2005. 7. 19)

우리나라의 경우 원자력 발전소에 대하여 미국 원자력 규제위원회 적용기준을 준용하고 있다. 원자력 발전소의 부지선정은 지질, 지진, 기상, 환경 등 여러 조사과정을 거쳐 이루어지며 이 중 지질 및 지진조사는 부지의 내진성 확보에 최대의 목표를 두고 상세하게 수행되고 있다. 국내의 경우 부지선정 단계에서 부지중심 반경 320km 이내는 광역지질조사와 지진조사를 통하여 지질 및 지진특성을 규명하고 삼국유사 등 고대문헌에 나타난 지진기록과 계측된 지진중에서 발전소에 가장 크게 영향을 미치는 지진을 산출하고 이것을 설계지진인 안정정지진(SSE : Safe Shutdown Earthquake)으로 정의하여 최대지반가속도를 중력가속도로 0.2g, 진도로서 MMI VII~VIII로 정하여 발전소의 내진설계를 하고 있다.

2.1 평가항목

원전 기초지반은 지진 등의 외적 조건에 의해 적납건물의 안정성에 중대한 영향을 미치지 않아야 하며, 이를 위해 기초지반의 활동, 지지력, 침하등의 안정성을 검토해야 한다. 그러나, 일반적으로 원전 기초지반은 충분한 지지력이 확보되는 안정된 지반이 선정되기 때문에 지지력이나 침하가 특별히 문제되는 일은 발생하지 않는다. 따라서 지반에 활동파괴가 생기지 않는 것이 확인되면 지지력이나 침하에 대해서도 안정성을 확보하고 있는 것으로 판정한다.

활동에 대한 안정검토는 일반적으로 활동면해석을 이용하지만 지반의 안정성에 여유가 없는 경우, 지반구조가 복잡한 경우, 단층 및 파쇄대 등의 연약대가 발달한 경우에는 활동면해석 이외에 등가정적해석 또는 동적해석 방법을 사용한다.⁽²⁾

지지력 및 침하에 대한 안정성 검토는 지반에 단층파쇄대 등과 같은 연약대가 발달해 있는 경우나 기초저면의 위치에 따라 지반물성이 큰 폭으로 달라지는 경우 등에 대해서 등가정적해석 및 지반의 비선형성을 고려한 동적해석 등을 이용하여 상세한 검토를 행할 필요가 있다.

2.2 평가방법

설계용 지진에 의한 기초지반의 지진안정성 평가방법으로 활동면해석, 유한요소법을 이용하는 등가정적해석 및 동적해석이 적용되고 있다. 활동면해석은 주로 힘의 합에 의해 지진안정성을 평가하는 방법이며, 등가정적해석법은 지진하중을 등가의 정하중으로 고려한 후 정적해석을 수행하는 방법이다. 동적해석방법은 지진, 지반 및 구조물의 동적특성을 고려하여 응답스펙트럼 또는 가속도-시간 이력관계를 이용하여 해석하는 방법이다. 특히 동적해석은 지진하중의 특성이 반영되므로 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.^{(12),(15)}

원전 기초지반의 지진안정성 평가는 최종적으로 기준지

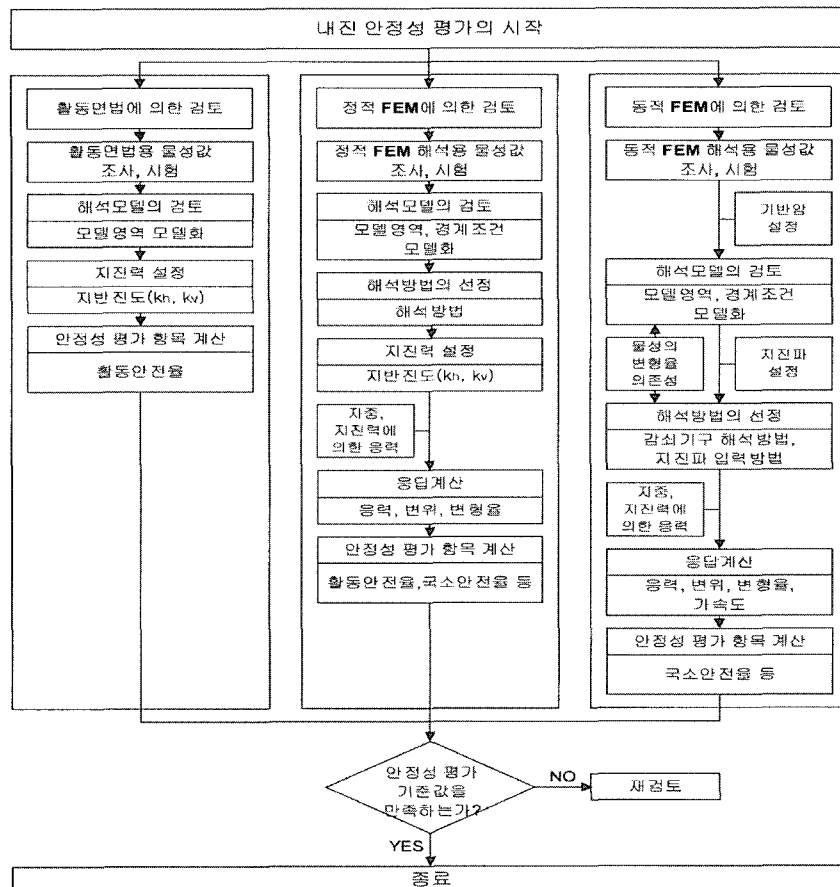


그림 1 원전 기초지반의 지진 안정성 평가 흐름도

표 1 민감도 해석을 위한 해석변수

해석변수	해석조건
▶ 지진의 작용방향	보수적인 활동안전율을 제시하는 입력지진의 작용방향 결정 - 수평진도 : 좌측, 우측 - 수직진도 : 상향, 하향
▶ 경계조건	등가정적해석과 동적해석에 적용가능한 경계조건 결정 - 등가정적 해석 : 저면-고정, 측면 - 수평 및 수직롤러, 고정, 자유 - 동적해석 : 저면 - 고정 및 점성, 측면 - 전달, 수평 및 수직롤러
▶ 해석모델의 폭 및 깊이	효율적인 수치해석을 위한 최적의 수치해석모델 폭 및 깊이 결정 - 해석 폭 : 기초폭의 1배(50m)~10배(500m), 50m간격 - 해석 깊이 : 격납건물 기초폭의 1배(50m)~3배 (150m), 50m 간격
▶ 단층연약대의 두께	평면변형률 요소의 적용성 평가 - 절리 폭 : 0.15, 0.5, 1.0, 2.0m

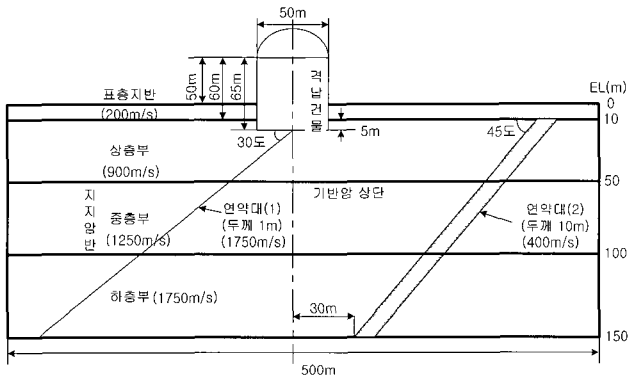


그림 2 표준 지반모델도

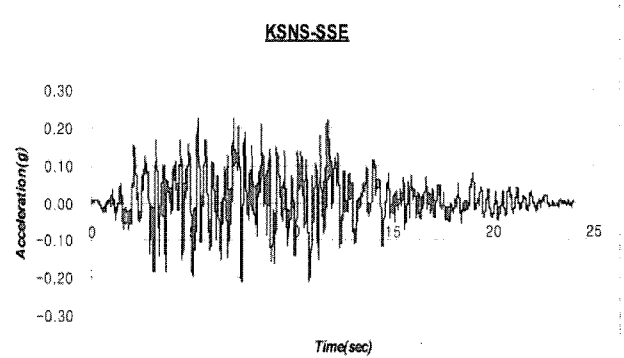


그림 3 입력지진파

진동을 적용한 동적해석을 수행하지만, 계산의 간편함과 풍부한 적용 예를 축적하고 있는 활동면해석 및 등가정적해석을 이용한 지진안정성 검토도 필수적이라 할수 있다. 국내의 경우 구조물의 중요도에 따라 내진등급을 부여하고 내진등급에 따라 해석방법을 달리 적용하고 있다.⁽¹¹⁾⁻⁽¹²⁾ 각 방법을 적용한 지진안정성 평가 절차는 그림 1과 같다.⁽³⁾

3. 해석 조건

원전 기초지반의 지진안정성 평가 순서는 그림 1에 나

타낸 것과 같이 활동면해석(관용법), 등가정적해석, 동적해석의 순이다. 각 평가방법에 의하여 원전 기초지반의 지진안정성을 정확히 평가하기 위해서는 평가대상지반을 공학적 지질조사와 암반평가 결과에 따라 지반모델을 적절히 구성하는 것과 해석방법에 따라 적절한 해석조건을 부여하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 각 해석방법에 따른 원전 기초지반의 지진안정성 평가시 효율적인 수치해석을 수행하기 위하여 해석결과에 큰 영향을 미치는 다양한 해석변수를 선정하여 민감도해석을 수행하고 그 결과에 따라 최적의 수치해석모델을 제시하였다.

표 2 지반 재료물성값

항 목	단 위	격납 건물	표층 지반	연약대1 (파쇄대)	연약대2 (불균질부)	암 반		
						상층	중층	하층
두께	m	-	10	1	10	40	50	50
정 탄성계수(E)	Kgf/cm ²	294,300	1,940	2,350	9,400	50,000	100,000	200,000
정 포아송비(v)	-	0.18	0.4	0.4	0.4	0.25	0.25	0.2
단위체적중량(γ_t)	tf/m ³	1.5	1.7	2.0	2.0	2.4	2.5	2.6
점착력(C)	Kgf/cm ²	100	0	0.4	0.4	25	50	100
내부마찰각(ϕ)	°	45	35	25	25	40	40	45
S 파 속도(V_s)	m/s	-	200	200	400	900	1,250	1,750
전단탄성계수(G)	Kgf/cm ²	117,000	690	820	3,270	20,000	40,000	83,333
동 탄성계수(E_d)	Kgf/cm ²	294,300	1,940	2,350	9,400	50,000	100,000	200,000
동 포아송비(ν_d)	-	0.25	0.4	0.44	0.44	0.4	0.4	0.35
감쇠정수(h)	%	5	2~20	2~20	5	5	5	5

표 3 안전정지지진으로 인한 격납건물의 관성력

구 분	자 중	지진시 연직력	지진시 전단력	지진시 모멘트
하 중	23.628(tf/m ²)	5.919(tf/m ²)	8.627(tf/m ²)	28.891(tf/m ²)

3.1 해석변수

원전 기초지반의 지진안정성 평가시 최적의 수치해석모델을 제시하기 위하여 입력지진의 작용방향, 경계조건, 해석모델의 폭 및 깊이, 단층연약대의 모델링 방법등의 해석변수에 대하여 민감도 해석을 수행하였다. 해석시 적용된 해석변수는 표 1과 같다.

3.2 해석모델

민감도해석에 적용된 지반모델은 그림 2와 같이 표층지반, 상층암반, 중층암반, 하층암반의 4개의 성층지반과 격납건물의 중앙에서 하방 30°의 각도로 지중을 향해 뻗어나가는 두께 1 m의 파쇄대, 그리고 원자로와 가까운 거리에 두께 10 m의 연약대가 존재하는 지반으로 가정하여 해석에 적용하였다. 각 지층별 재료의 물성값은 표 2와 같다. 해석시 적용된 지진파는 그림 3과 같이 한국 표준원전 안전정지지진에 근거한 가속도 파형을 적용하였다.

활동면해석에 의한 활동안전을 계산시 지반에 재하되는 안전정지지진으로 인한 표준원전 격납건물의 관성력은 표 3과 같다.

여기서 각 방향 하중은 격납건물 기초의 면적으로 나누어 등분포하중으로 지반에 재하하였으며, 모멘트는 연직 등분포하중으로 치환하여 적용하였다.

4. 해석결과

4.1 지진파 작용방향에 대한 영향

진도법을 적용하여 구조물의 지진안정성 평가시 수직진도는 무시하는 것이 일반적이다. 하지만 원전 구조물의 경우 구조물의 중요도를 감안하여 수평진도와 수직진도를 동시에 적용하여 안정성 평가를 수행하여야 한다.⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾ 따라서 본 해석에서는 입력지진의 작용방향에 따른 안정성 평가를 수행하여 원전구조물의 지진안정성 평가시 보수적인 활동안전율이 발생하는 입력지진의 작용방향을 제시하고자 표 4와 같은 조건으로 해석을 수행하였다.

표 4 입력지진의 작용 방향

구 분	수직진도없음	수직진도 상향	수직진도 하향
수평진도 (좌측)	좌측(←) 0.2g	좌측(←) 0.2g, 상향(↑) 0.13g	좌측(←) 0.2g, 하향(↓) 0.13g
수평진도 (우측)	우측(→) 0.2g	우측(→) 0.2g, 상향(↑) 0.13g	우측(→) 0.2g, 하향(↓) 0.13g

활동면해석 및 등가정적해석에 의한 원전기초의 지진안정성 평가시 등가정적 해석결과를 근거로 총 4개의 활동면을 선정하여 해석을 실시하였다. 적용프로그램은 활동면해석에 의한 지반 안정성 평가에 널리 적용되는 사면안정 해석프로그램인 "COSTANAK"과 임의 활동면에 대한 활동안전율 산정이 가능한 "AFIMEX-SANC"프로그램을 이용하였다. 그림 4와 같이 격납건물은 지진시 지반에 재하되는 하중으로 치환하여 해석에 적용하였다.

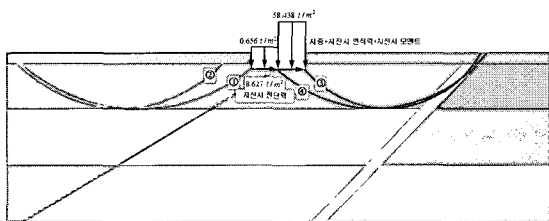
활동면해석을 적용하여 입력지진의 작용방향에 따른 활동안전율을 해석결과를 표 5와 같다. 해석결과 지진력의 작용방향에 따른 활동안전율의 차이는 미소한 것으로 나타났으나, 수평-좌측 및 수직-상향 입력조건에서 가장 작은 활동안전율이 발생하는 것으로 나타났다. 활동면해석에 의한 해석결과 수직진도에 대한 영향이 미소하였기 때문에 수평방향 지진력만을 고려하여 등가정적해석을 수행하였다. 해석결과 표 6과 같이 등가정적 해석결과가 활동면해석을 적용한 경우보다 지진력의 작용방향에 따른 활동안전율의 변화가 훨씬 크게 나타났다. 이러한 결과는 등가정적 해석의 경우 격납건물의 시공과정과 지진력의 재하에 따른 지반의 변형특성 및 강도특성등이 반영되었기 때문으로 사료된다.

4.2 경계조건의 영향

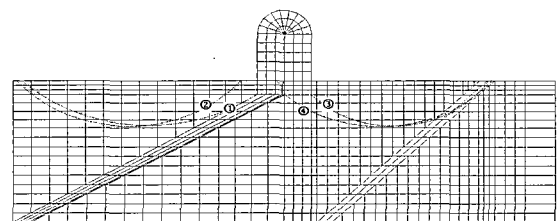
해석모델에 적용되는 경계조건에 따른 변위, 응력, 가속도등의 변화 경향을 평가하고자 등가정적 해석 및 동적해석을 표 7의 경계조건을 적용하여 해석을 실시하였다.

등가정적해석시 선형탄성모델을 적용하여 [원지반 조건]-[지반굴착조건]-[격납건물준공조건]-[지진력 작용조건]의 순서로 단계해석을 수행하였으며, 0.2g의 수평진도를 좌측방향으로 적용하였다.

동적해석시 직접적분법에 의한 선형탄성 해석법을 적용하였으며, 등가정적해석과 동일하게 시공단계를 고려한 정



(a) 활동면해석



(b) 등가정적 해석

그림 4 지진파 작용방향에 따른 해석모델도

표 5 지진력 작용 방향에 따른 활동안전율(활동면해석)

구 분	활동면번호			
	1	2	3	4
좌측(←)으로 0.2g	25.19	25.91	20.62	16.40
좌측(←)으로 0.2g, 상향(↑)으로 0.13g	25.37	25.91	20.56	16.05
좌측(←)으로 0.2g, 하향(↓)으로 0.13g	25.02	25.91	21.51	16.76
우측(→)으로 0.2g	22.74	25.91	21.58	17.17
우측(→)으로 0.2g, 상향(↑)으로 0.13g	22.60	25.91	21.65	17.57
우측(→)으로 0.2g, 하향(↓)으로 0.13g	22.89	25.91	21.51	16.79

표 6 지진력 작용방향과 해석방법에 따른 활동안전율 결과

구 분		활동면번호			
		1	2	3	4
좌측(←) 0.2g	등가정적해석	18.594	27.351	22.628	30.259
	활동면해석	25.194	25.913	20.617	16.398
우측(→) 0.2g	등가정적해석	24.138	26.740	15.023	11.244
	활동면해석	22.742	25.913	21.579	17.172

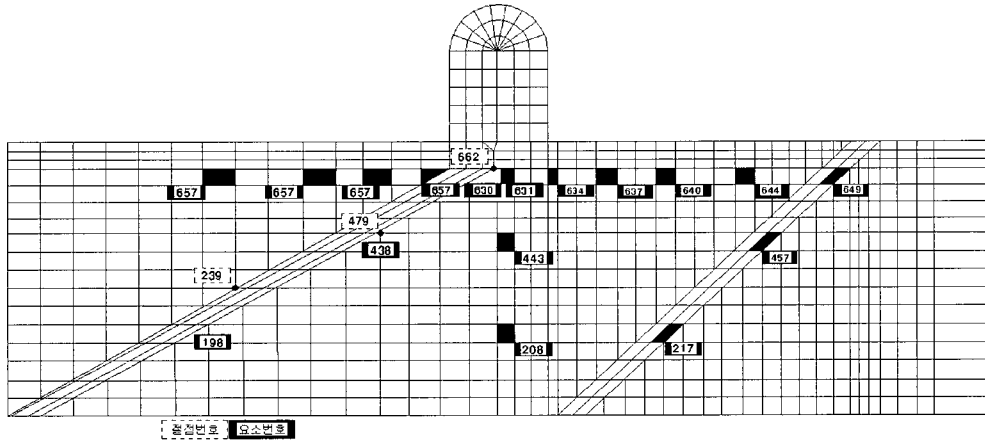


그림 5 경계조건에 따른 해석모델도

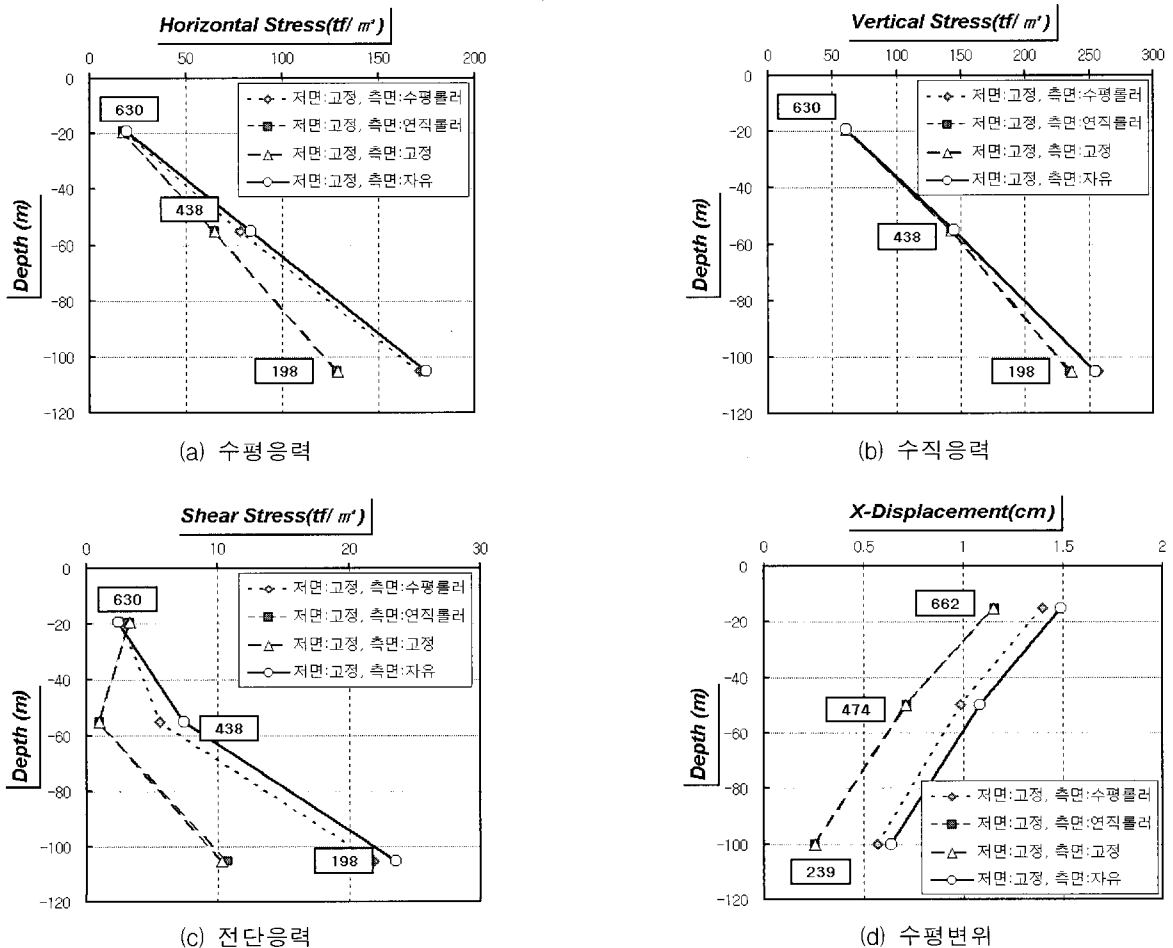


그림 6 경계조건에 따른 등가정적 해석결과

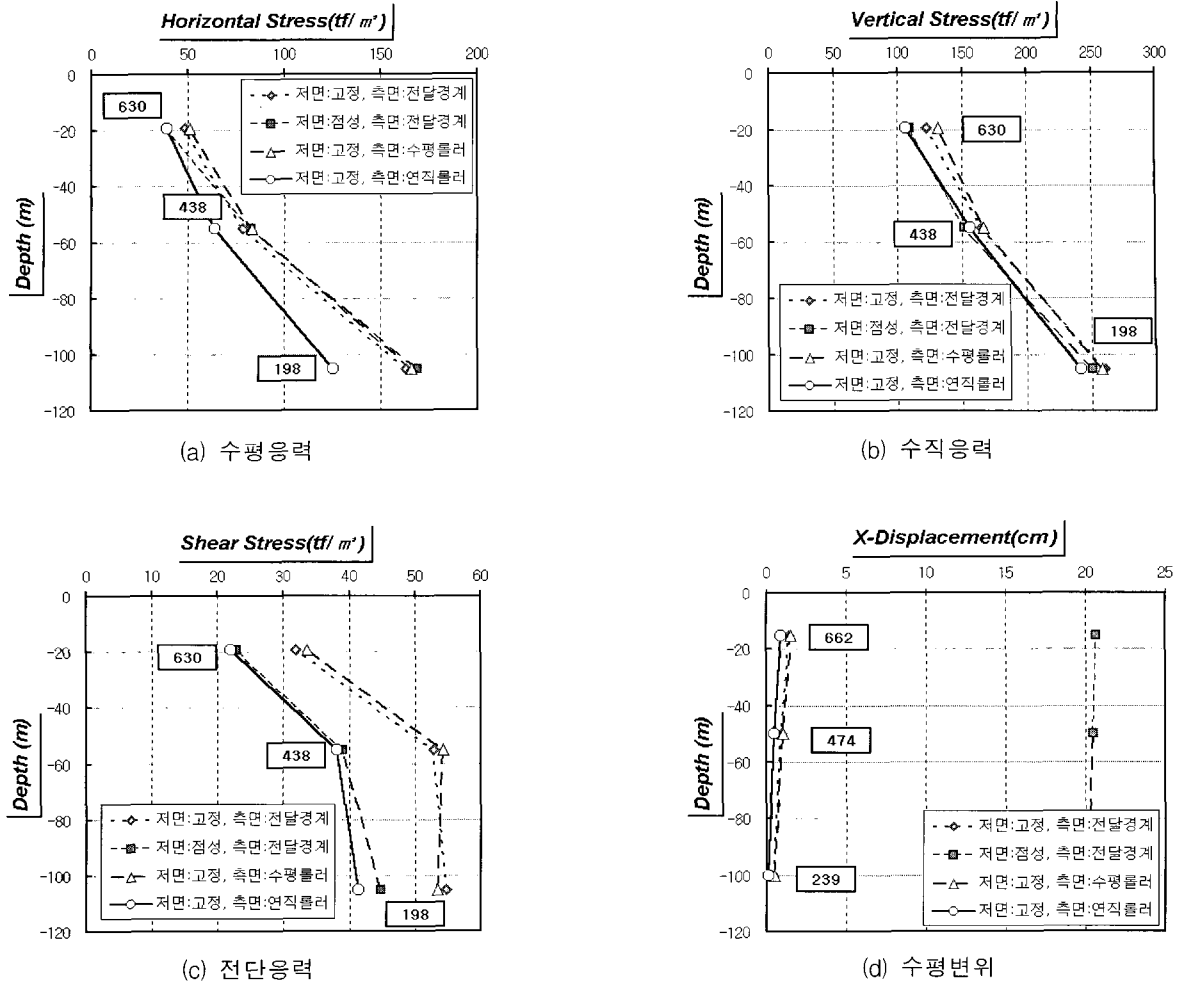


그림 7 경계조건에 따른 동적 해석결과

표 7 경계조건의 영향분석을 위한 해석 CASE

경계조건		해석 CASE			
		1	2	3	4
등가정적 해석	저면	고정	고정	고정	고정
	측면	수평롤러	연직롤러	고정	자유
동적해석	저면	고정	점성	고정	고정
	측면	전달경계	전달경계	수평롤러	연직롤러

적해석을 수행한후 기반암 상단에서 최대지진가속도가 0.2g 가 되도록 조정하여 해석을 수행하였다.

해석시 상용 유한요소 프로그램(지반-구조물상호작용 전용해석프로그램;SSI)인 TDAP-III를 적용하였으며, 그림 5의 해석모델도에 대하여 표 7의 경계조건을 변화하여 해석을 수행하였다. 그림 5의 숫자는 해석결과 값을 비교하기 위한 요소번호이다.

경계조건의 변화에 따른 해석결과의 영향을 분석하고자 경계조건별 최대 수평 및 수직응력, 최대전단응력, 최대수평변위를 비교하였다. 등가정적 해석을 수행한 결과는 그림 6과 같다. 해석결과 측면경계에 인접한 요소에서는 경계조건의 변화에 따른 응력값의 차이가 뚜렷하게 발생하였으

나, 중앙부 요소의 응력값의 차이는 미소한 것으로 나타났다. 측면경계조건이 연직롤러인 경우와 고정인 경우 해석결과가 매우 유사한 경향을 나타내며, 수평롤러와 자유조건의 경향이 유사한 것으로 나타났다. 측면구속조건에 따른 응력값과 변위값의 크기는 고정 < 연직롤러 < 수평롤러 < 자유의 경향으로 나타났다. 경계조건의 차이에 따른 수평 및 수직응력값의 변화는 미소하나, 전단응력은 뚜렷한 차이를 나타내며 측면 자유조건인 경우 가장 큰 전단응력이 발생하는 것으로 나타났다. 이상의 해석결과 등가정적 해석시 연직방향 경계조건보다는 수평방향 경계 조건이 해석결과에 더 큰 영향을 미치며, 등가정적 해석시 측면경계조건을 수평롤러로 적용하는 것이 더욱 보수적인 결과를 나타내는 것으로 판단된다.

경계조건의 변화에 따른 동적해석결과는 그림 7과 같다. 해석결과 응력 및 변위값은 저면 경계조건(고정경계, 점성경계)의 변화보다는 측면 경계조건(전달경계, 수평롤러, 수직롤러(수평고정)⁽⁷⁾)의 변화에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 측면에 전달경계와 수평롤러를 적용한 경우에는 응력 및 변위값의 차이가 미소하지만, 수직롤러(수평고정)를 적용한 경우에는 응력 및 변위값의 크기가 다른 두 조건에 비하여 크게 감소하였다. 이는 지반의 측면경계에서 수평방향 변형이 구속됨으로 인해 지반

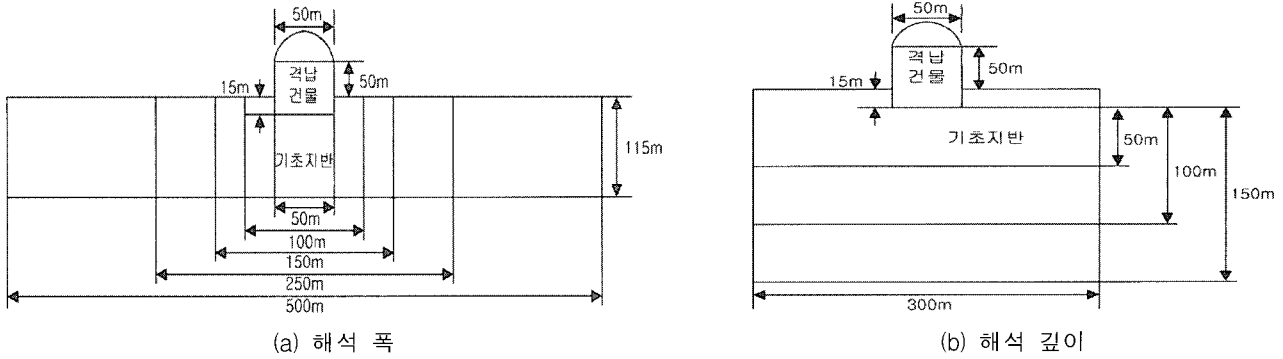


그림 8 해석 영역의 조건도

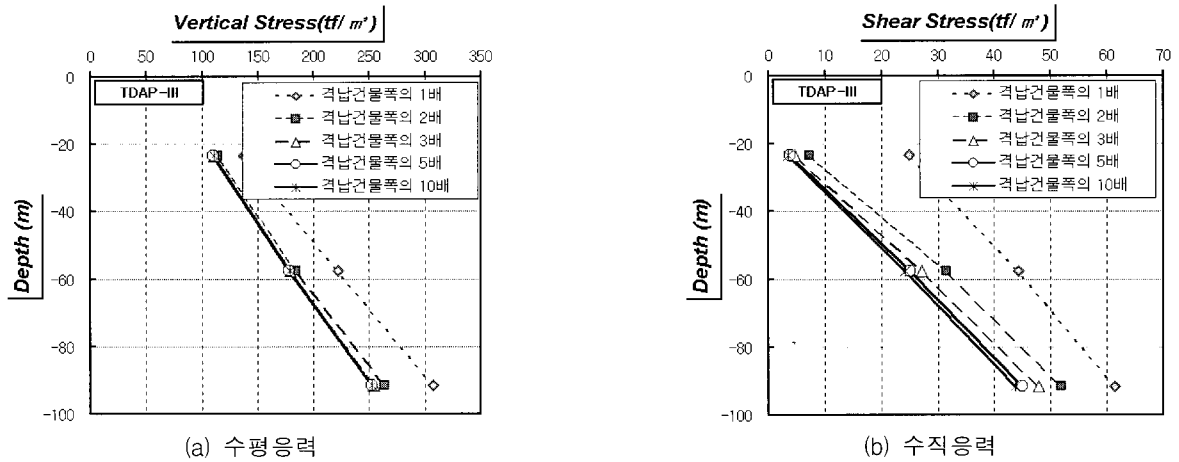


그림 9 해석 폭의 변화에 따른 해석결과

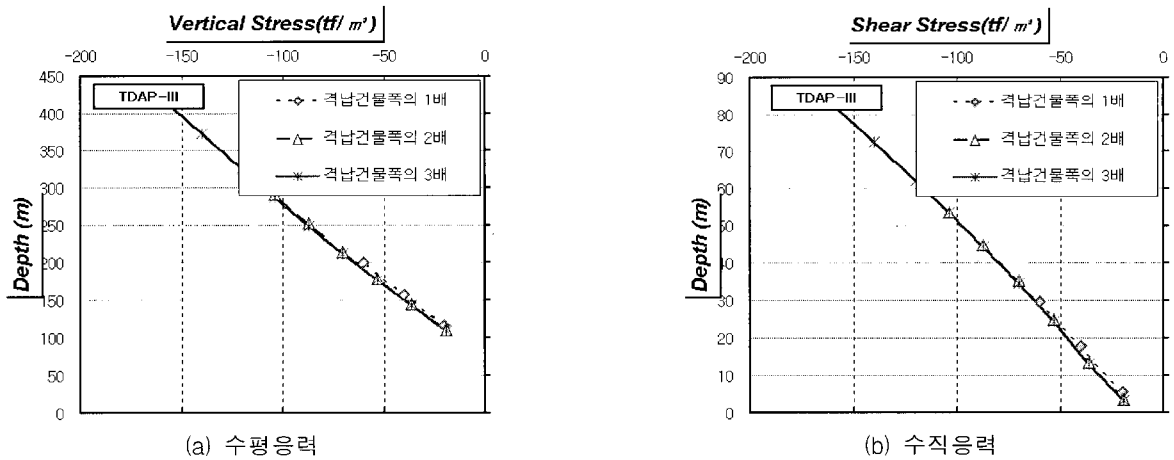


그림 10 해석 깊이의 변화에 따른 해석결과

에서 발생한 응력과 변위가 영향을 받았기 때문에 판단된다. 이상과 같이 동적해석시 측면경계를 전달경계나 수평롤러로 적용하는 것이 보수적인 해석결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

일반적으로 동적해석을 수행할 경우 측면 경계조건에 따라 해석결과에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 측면경계는 전달경계를 권장하고 있으나⁽²⁾ 해석모델의 폭이 충분한 경우에는 수평롤러의 측면경계조건도 적용 가능한 것으로 판단된다.

4.3 해석 영역에 대한 영향

일반적으로 수치해석에 의한 지진해석 수행시 해석모델의 크기(깊이, 폭)에 따라 요소망의 크기, 밀도 및 구조물과 경계면의 거리등의 영향으로 해석결과가 상이하게 나타난다. 즉, 해석모델을 구성하는 해석영역의 크기가 해석결과에 정확도에 영향을 미치게 되고, 특히, 원전의 격납건물과 같은 중량 구조물이 지반상에 존재하는 경우에 구조물의 크기에 비해 해석지반모델의 깊이나 폭이 작게되

표 8 절리두께에 따른 강성

물성값 절리두께	접선강성 (Ks, tf/m ²)	수직강성 (Kn, tf/m ²)	비고
0.15m	55,952	335,714	단층연약대 1의 - 동 탄성계수(E, tf/m ²) = 23,500 - 동 포아송비(ν) = 0.4
0.5m	16,786	100,714	
1.0m	8,393	50,357	
2.0m	4,196	25,179	

면 경계조건(구속조건)에 의한 영향을 구조물과 구조물 주변의 지반요소가 직접적으로 받게 되어 해석결과의 신뢰도가 감소하게 된다. 따라서 본 연구에서는 해석모델의 폭 및 깊이가 해석결과에 미치는 영향을 검토하고, 그 결과를 분석하여 원전 기초지반의 지진안정성 평가에 적절한 해석영역을 제시하였다.

효율적인 해석모델의 폭을 결정하기 위하여 해석모델의 폭을 격납건물 기초 폭의 1배~10배까지 변화시켜 해석을 수행하였으며, 해석모델의 깊이에 대한 영향을 분석하고

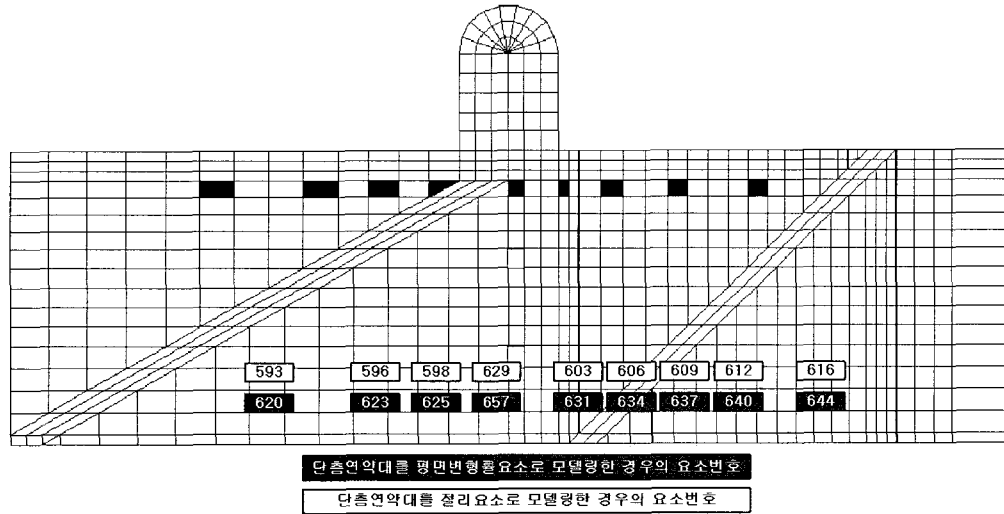


그림 11 단층연약대를 고려한 해석모델도

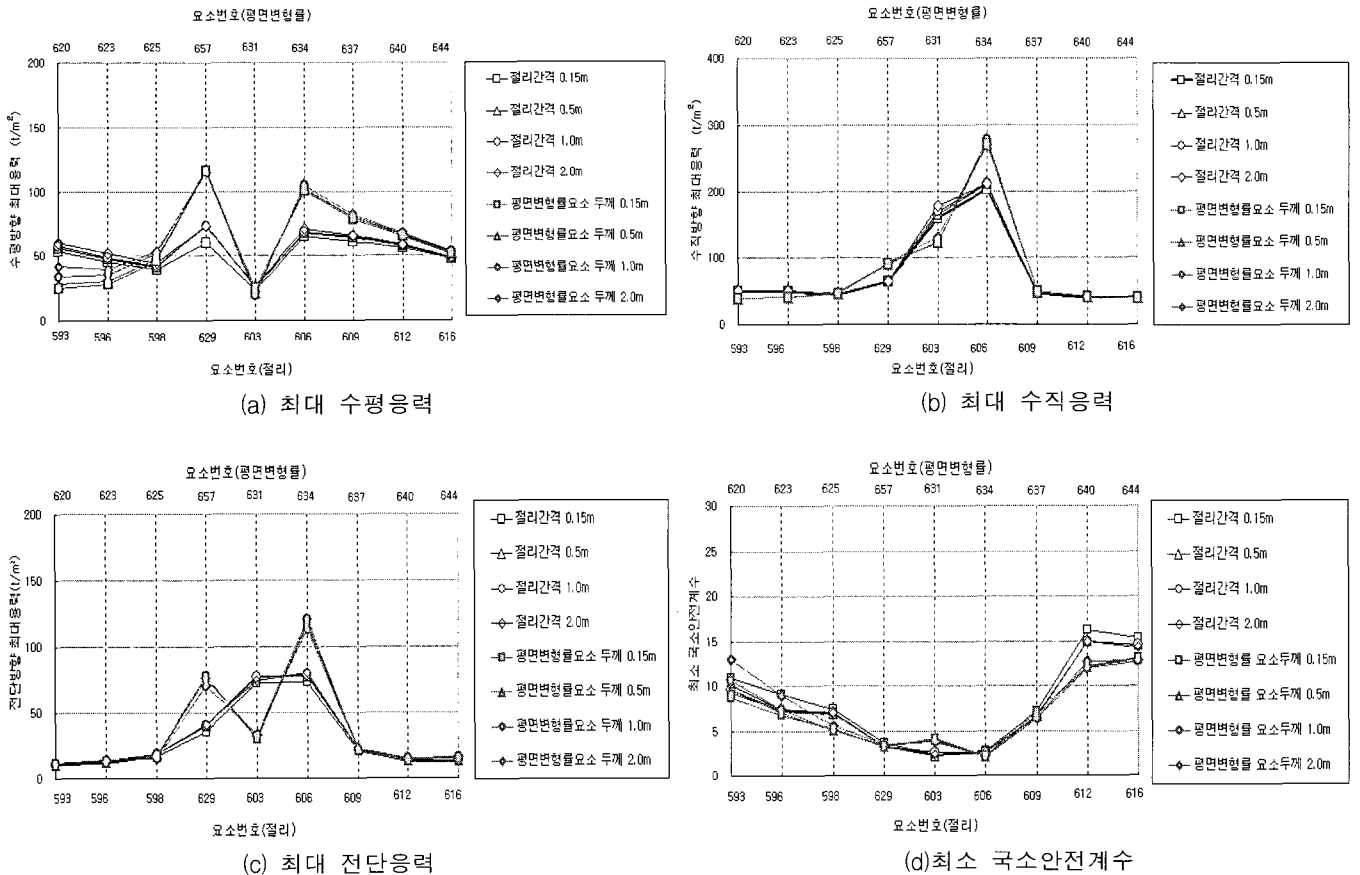


그림 12 단층연약대의 모델링 방법에 따른 해석결과

자 해석모델의 깊이를 격납건물 기초폭의 1배~3배까지 변화시켜 등가정적 해석을 수행하였다. 해석영역에 대한 영향을 분석하고자 적용된 해석조건은 그림 8와 같다.

등가정적해석시 해석단계는 [초기응력해석]-[지진력해석]의 두단계를 적용하였으며, 경계조건은 4.2의 분석결과를 바탕으로 저면-고정, 측면-수평롤러로 설정하였으며, 지진력은 수평방향으로 0.2g를 적용하였다. 해석결과는 그림 9, 그림 10과 같다.

해석결과 각 방향 응력 및 수평변위는 해석모델의 폭이 격납건물 기초폭의 5배 이상이면 10배인 경우와 거의 유사한 안정된 해석결과를 나타냈으며, 해석모델의 깊이에 대한 해석결과 격납건물 기초폭의 2배 이상이면 3배인 경우와 거의 유사한 안정된 해석결과를 나타냈다. 이상의 해석결과 원전 기초 지반의 지진안정성 평가시 해석영역의 폭은 구조물 폭의 5배 이상, 깊이는 2배 이상이 적절한 것으로 판단된다.

4.4 단층연약대의 모델링 방법에 대한 영향

단층연약대가 존재하는 원전기초지반의 지진안정성 평가시 단층연약대 표현을 위한 모델링 요소의 차이에 따른 영향을 평가하고자 평면변형률 요소 및 절리요소를 적용하여 동적해석을 수행하였다. 해석시 단층연약대의 두께를 0.15, 0.5, 1.0, 2.0m로 변화시켜 두 요소간의 변화경향을 분석하였다. 평면변형률 요소로 모델링시 표 2의 물성값을 적용하였으며⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾, 절리요소로 모델링시 절리요소의 두께변화에 따른 강성의 변화를 고려하여 다음 표 8의 물성값을 적용하였다.

동적해석시 단층연약대에 절리요소를 적용할수 있는 TDAP-III를 이용하였으며, 직접적분법에 의한 선형탄성법을 적용하였다. 지표면에서 50m 깊이를 기반암 상단으로 가정하였으며, 기반암 상단에서 최대지진가속도가 0.2g가 되도록 지진파를 조정하여 적용하였다. 해석모델의 측면 경계는 전달경계, 저면경계는 고정경계를 적용하였으며, 시공단계를 고려한 정적해석 후 동적해석을 수행하였다. 해석모델도는 그림 11과 같다.

해석조건에 따라 그림 12에 표시된 격납건물하단의 중앙과 우측 4개 지점, 좌측 4개 지점의 총 9개 요소에 대한 해석결과를 비교하였다. 해석결과는 그림 12와 같다.

해석결과 단층연약대에 평면변형률요소를 적용한 해석결과가 절리요소를 적용한 경우에 비하여 각 방향 최대응력, 최대응답변위, 최대응답가속도 등이 다소 크게 나타났다. 이러한 결과는 절리요소 적용시 절리면을 통한 지진 에너지의 소산효과가 발생하기 때문으로 판단된다.

전반적인 동적해석의 응답결과(최대응력, 최대응답변위, 최대응답가속도)는 거의 유사한 것으로 나타났으며, 지진안정성평가의 기준이 되는 최소국소안전계수도 거의 일치하는 것으로 나타났다.

이상의 해석결과 단층연약대를 절리요소로 모델링한

경우에 비하여 평면변형률요소를 적용한 경우가 다소 보수적인 결과를 나타내며, 지진안정성평가의 기준이 되는 국소안전계수는 비교적 잘 일치하므로, 동적해석시 적절한 연약대의 물성평가가 선행된다면 평면변형률 요소를 이용한 단층연약대의 모델링도 적용가능하리라 사료된다.

5. 결 론

원전 기초의 지진안정성 평가방법 적용시 합리적인 해석모델을 제시하고자 입력지진의 작용방향, 경계조건, 해석모델의 폭 및 깊이, 단층연약대의 모델링방법 등의 해석조건에 대하여 활동면해석, 등가정적해석법, 동적해석법을 적용한 결과는 다음과 같다.

- 1) 입력지진의 작용방향에 대한 해석결과 지진력의 작용방향에 따른 활동안전율의 차이는 미소하나, 수평-좌측 및 수직-상향과 입력조건에서 가장 작은 활동안전율이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 지반의 강도 및 변형 특성 등이 반영된 등가정적 해석결과는 지진력의 작용방향에 따른 안전율의 변화가 큰 것으로 나타났다.
- 2) 경계조건의 영향에 대한 해석결과 등가정적 해석시 연직방향의 경계조건보다는 수평방향 경계조건이 해석결과에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 측면경계조건을 등가정적 해석시 수평롤러, 동적해석시 전달경계로 적용한 조건에서 가장 보수적인 결과값을 나타냈다.
- 3) 해석영역에 대한 영향 분석결과 해석영역의 폭은 구조물 폭의 5배 이상, 깊이는 구조물 폭의 2배 이상을 적용하여 해석을 수행하였을 때 해석영역에 대한 결과값의 차이가 미소한 것으로 나타났다.
- 4) 단층연약대의 모델링 방법에 따른 영향 검토결과 평면변형률 요소를 적용한 해석결과가 절리요소를 적용한 해석결과와 비교적 잘 일치하므로, 적절한 연약대의 물성평가 후 평면 변형률 요소를 적용한 해석방법도 적용가능 하리라 사료된다.
- 5) 본 연구는 원전기초에 대한 지진안정성 평가시 기초적인 자료 제공 및 해석, 평가 지침을 제시하고자 해석단면 및 지반조건을 가정하여 해석을 수행한 결과이므로, 향후 국내현실을 반영한 보다 심도 깊은 연구가 진행되어야 될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국 수력원자력 주식회사의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 日本土木學會, 動的解析と耐震設計, 第2卷, 動的解析の方法, 1989.

2. 日本土木學會, 動的解析と耐震設計, 第3卷, エネルギー施設, 1989.
3. 日本原子力安全委員會 原子爐安全基準專門部會, 發電用原子爐施設に關する耐震設計審査指針, 1981.
4. Whitman R. V., *Soil-Structure Interaction, Seismic Design for Nuclear Power Plants*, MIT Press, 1970.
5. Penzien, J., Scheffey, C. F. and Parmelee, A., "Seismic Analysis of Bridges on Long Piles," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Proceedings of the ASCE, 1964.
6. Okabe, T., Kishi, K. and Ohtsuki, H., "Evaluation of Seismic Stability of Nonhomogeneous Soft Bed Rock," *International Symposium on Weak Rock*, 1981, pp. 61-64.
7. Lee, K. L., Seed, H. B. and Dunlop, P., "Effect of Transient Loading on the Strength of Sand," *Proc. 7th ICSMFE*, Vol.1, 1969, pp. 239-247.
8. Goodman, R. E., *Introduction to Rock Mechanics 2nd edition*, John Wiley & Sons, 562pp.
9. Goodman, R. E., *Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks*, West Publishing Company, 472pp.
10. Skempton, A. W., "Long-Term Stability of Clay Slopes," *Geotechnique*, Vol.14, No.2, 1964.
11. 건설교통부, 댐설계기준, 2001.
12. (사)한국항만협회, 항만 및 어항 설계기준, 2000.
13. 환경부, 상수도시설 내진 설계기준 마련을 위한 연구, 1999.
14. 환경부, 폐기물 매립시설의 내진설계 기준 연구, 2001.
15. 건설교통부, 내진설계기준 연구(II), 1997.