

KAERI/TR-3939/2009

## 지하 원자력 시설의 장단점 분석

Strengths and Weakness of Underground Nuclear  
Plants

*KAERI*  
2009. 11.



**한국원자력연구원**  
Korea Atomic Energy Research Institute

# 제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2009년도 “연구로 계통공학 기술 연구” 과제의 기술보고서로 제출합니다.

제목 : 지하 원자력 시설의 장단점 분석  
(Strengths and Weakness of Underground Nuclear Plants)

2009년 11월

KAERI

주 저 자 : 이 진 호 (연구로공학부)

공 저 자 : 류 정 수 (연구로공학부)

## 요 약 문

최첨단의 건설기술은 거대한 지하 구조물의 실현을 가능하게 하여, 많은 새로운 구조물이 기존의 제약을 벗어나 지하에 건설되고 있다. 지하 구조물의 건설은 사용 가능한 지상 공간을 증가시킬 뿐만 아니라 지상 구조물에서는 특별히 고려해야만 했던 여러 가지 문제들을 해소하여 그 안전성과 신뢰성을 증가시킬 수 있지만, 원자력발전소의 경우는 사소한 사고가 엄청난 파국을 불러올 수 있기에 새로운 건설기술의 적용을 더욱더 신중하게 만들고 있다.

본 연구에서는 지하 원자력 시설의 장점을 지상 원자력 시설과 비교하여 검토하였다. 또한, 지하구조물 또는 지중식 구조물의 구조해석 방법 중 응답변위법, 응답진도법, 동적해석법에 대해 정리하고 현재 우리나라에서 적용되고 있는 지하공동구 내진설계기준에 대해 요약하였다.

지하 원자력 시설은 격납능력의 향상, 내진안전성의 향상, 경제적 이득, 용이한 폐로와 같은 장점을 분명히 가지고 있다. 그러나 이에 대한 연구는 국내에서는 이루어진 적이 없고, 국외에서도 기초적인 연구밖에 이루어지지 않았다. 한정된 공간을 가지고 있는 우리나라와 같은 경우는 지하공간 활용의 중요성이 앞으로 더욱 부각되고, 지하 원자력 시설이 실현될 수도 있을 것이다. 이러한 미래를 대비하기 위해 지하 원자력 시설에 대한 상세한 연구가 이루어져 그 기술적 토대를 확보해야 할 것이다.

# Abstract

High construction technologies enable huge underground structures and a number of new structures are constructed underground over the limit. Construction of underground structures increases available surface space and resolves many specially-considered problems of onground structures, which increases safety and reliability of structures. Since a slight accident of a nuclear plant can bring a catastrophe, however, application of new construction technologies is required to be careful.

In this study, strengths and weakness of underground nuclear plants are examined and compared with those of on-ground nuclear plants. Three fundamental concepts of seismic deformation method, response acceleration method, and dynamic analysis method for seismic response analysis of underground structures are reviewed. Korean seismic design code for underground cavity is summarized.

The underground nuclear plants have strengths such as upgrade of containment, improvement of seismic safety, economic benefits, and ease of decommission. However, a few studies have been performed about the underground nuclear plants. They are not studied in Korea. Since importance of the underground space is increasing in Korea which has limited surface space and underground nuclear plants will be constructed in the near future, strong theoretical and technical foundations has to be provided through detailed studies on the underground nuclear plants.

# 목 차

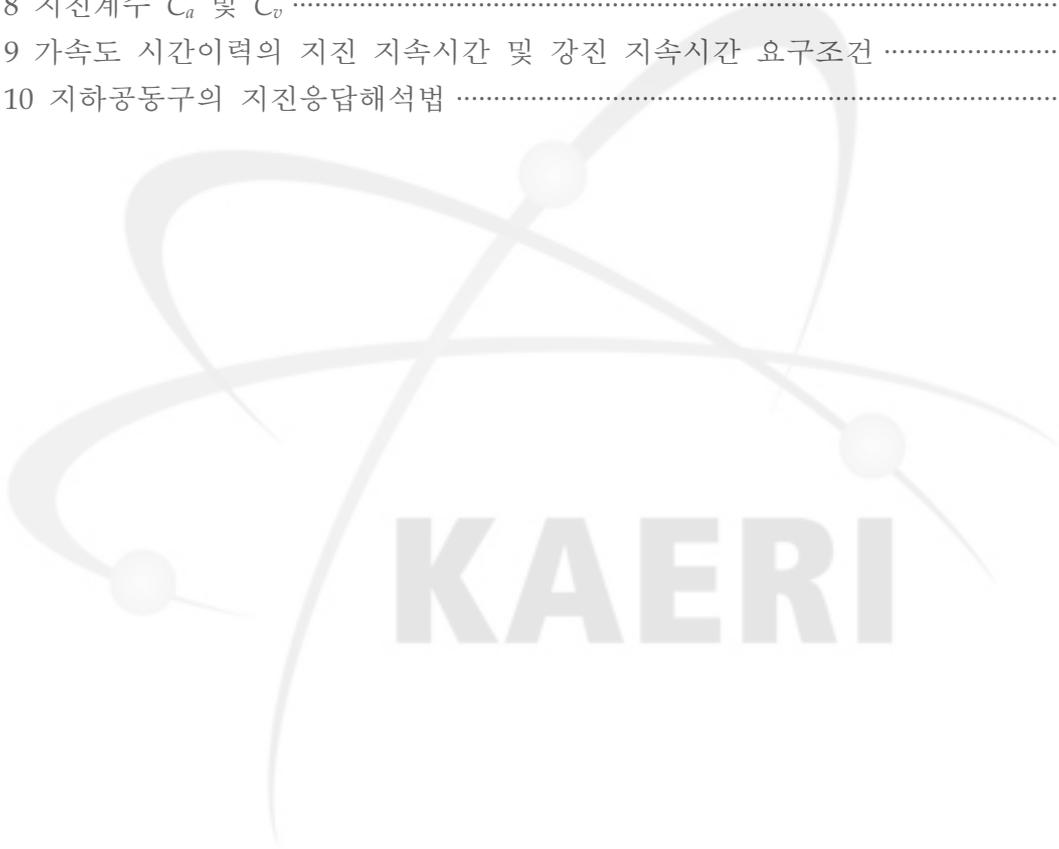
제 출 문 .....	i
요 약 문 .....	ii
Abstract .....	iii
목 차 .....	iv
표 목 차 .....	vi
그림목차 .....	vii
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 지하 원자력 시설의 장단점 분석 .....	2
제 1 절 지하 원자력 시설의 장점 .....	3
1. 격납 능력의 향상 .....	3
2. 내진 안전성의 향상 .....	5
3. 경제적 이득 .....	5
4. 용이한 폐로 .....	6
제 2 절 지하 원자력 시설의 단점 .....	6
제 3 장 지하 원자력 시설의 부지 선정 기준 .....	7
제 4 장 지중구조물의 지진응답해석법 .....	8
제 1 절 응답변위법 .....	8
제 2 절 응답진도법 .....	9
제 3 절 동적해석법 .....	10
제 5 장 지하공동구 내진설계기준 .....	12
제 1 절 설계일반사항 .....	12
1. 지하공동구의 내진등급 .....	12
2. 지하공동구의 내진성능목표 .....	12
3. 지하공동구의 설계거동한계 .....	13
제 2 절 내진설계방법 및 지진응답해석법 .....	14
1. 내진설계의 기본방침 .....	14
2. 지반조사 및 지반분류 .....	14
3. 설계지반운동 .....	15
4. 설계하중 및 하중조합 .....	18

5. 지진응답해석법 .....	19
제 3 절 상세 내진설계에 관한 내용 .....	20
제 6 장 결 론 .....	21
참 고 문 헌 .....	22



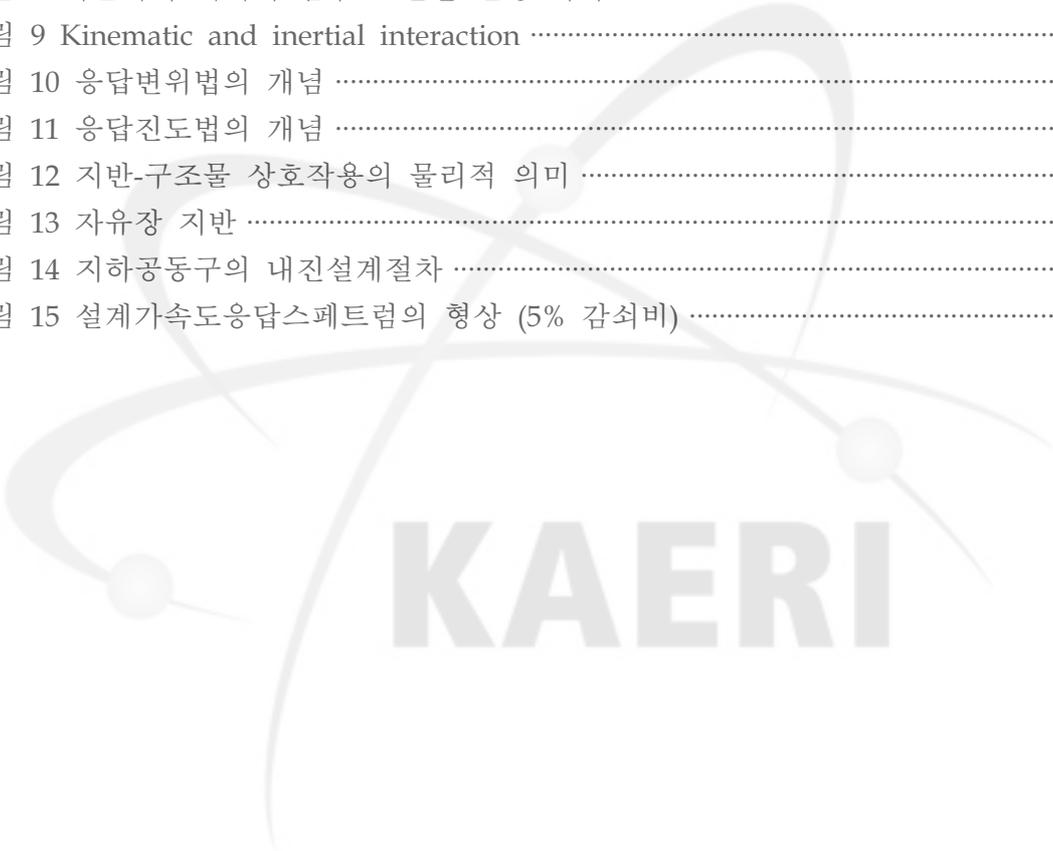
# 표 목 차

표 1 유럽의 주요 지하 원자력 시설 .....	2
표 2 내진성능목표 .....	13
표 3 설계거동한계 .....	13
표 4 기반지반의 분류 .....	15
표 5 지진구역 구분 .....	16
표 6 지진구역계수 $Z$ (재현주기 500년에 해당) .....	16
표 7 위험도계수 $I$ .....	16
표 8 지진계수 $C_a$ 및 $C_v$ .....	17
표 9 가속도 시간이력의 지진 지속시간 및 강진 지속시간 요구조건 .....	18
표 10 지하공동구의 지진응답해석법 .....	19



## 그림 목 차

그림 1 지하 원자력 시설 예시 .....	23
그림 2 가압경수로의 격납용기 .....	24
그림 3 내압을 받는 지하공동구가 위치한 지반에서의 응력분포 .....	25
그림 4 원통형 지하공동구의 최적 깊이 .....	26
그림 5 구형 지하공동구의 최적 깊이 .....	27
그림 6 지하 원자력발전소의 Liner 예시 .....	28
그림 7 암반의 질에 따른 Liner 두께의 변화 .....	29
그림 8 지반에서 기체의 침투로 인한 진행 거리 .....	31
그림 9 Kinematic and inertial interaction .....	32
그림 10 응답변위법의 개념 .....	33
그림 11 응답진도법의 개념 .....	34
그림 12 지반-구조물 상호작용의 물리적 의미 .....	35
그림 13 자유장 지반 .....	36
그림 14 지하공동구의 내진설계절차 .....	37
그림 15 설계가속도응답스펙트럼의 형상 (5% 감쇠비) .....	38

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features a stylized atomic symbol with three elliptical orbits and three spheres representing protons and neutrons. Below the symbol, the word "KAERI" is written in a bold, sans-serif font.

KAERI

## 제 1 장 서 론

원자력발전소의 격납용기는 하나의 상징적인 의미로 각인되어, 대부분의 사람들은 원자력발전소의 이미지로 거대한 격납용기를 떠올린다. 즉, 대부분의 원자력발전소는 거대한 격납용기의 전제하에 건설되고 운영된다. 이러한 거대한 격납용기는 원자력발전소의 안전 보장을 위해 필수불가결한 요소이지만 이로 인해 원자력발전소의 건설은 많은 면에서 제약을 받아 왔다.

최첨단의 건설기술은 거대한 지하 구조물의 실현을 가능하게 하여, 많은 새로운 구조물이 기존의 제약을 벗어나 지하에 건설되고 있다. 이미 우리 생활의 큰 부분으로 자리잡은 지하철 뿐만이 아니라 지하 고속철도, 지하 고속도로 외에 방사선펜기물 저장시설도 지하에 건설하는 것을 계획하고 있다. 이러한 지하 구조물의 건설은 사용 가능한 지상 공간을 증가시킬 뿐만이 아니라 지상 구조물에서는 특별히 고려해야만 했던 여러 가지 문제들을 해소하여 그 안전성과 신뢰성을 증가시킬 수 있다. 하지만, 원자력발전소나 연구용원자로와 같은 원자력 시설을 지하에 건설하는 것은 아직까지 제한적으로 고려되고 있다. 원자력 시설에서 발생하는 사소한 사고가 엄청난 파국을 불러올 수 있기에 새로운 건설기술의 적용을 더욱더 신중하게 만들고 있기 때문이다. 그러나, 지하 원자력 시설은 지상 원자력 시설과 비교하여 그 장점이 충분히 있고, 지상 원자력 시설에 가해지는 여러 가지 제약을 충분히 극복하여 좀 더 유연한 환경을 제공할 수 있다. 이러한 지하 원자력 시설에 관한 연구는 국내외에서 거의 이루어지지 않은 상태이다. 본 보고서에서는 이러한 지하 원자력 시설의 장점을 지상 원자력 시설과 비교하여 검토하고자 한다. 또한, 지하구조물 또는 지중식 구조물의 구조해석 방법에 대해 정리하고 현재 우리나라에서 적용되고 있는 지하공동구 내진설계기준에 대해 설명하고자 한다.

## 제 2 장 지하 원자력 시설의 장단점 분석

과거 몇 개의 지하 연구용 및 발전용 원자력 시설이 유럽에서 성공적으로 건설되어 운전되기도 하였다. 주요 유럽 지하 원자력 시설의 중요 특징이 표 1에 정리되어 있다.

표 1. 유럽의 주요 지하 원자력 시설

시설명(위치)	규모	목적	배치		깊이	원자로 공동 크기 (feet)
			터빈	원자로		
Halden (Norway)	25 Mwt	연구용	None	Rock cavern	98 feet	98' long 85' high 33' wide
Agesta (Stockholm, Sweden)	80 Mwt/ 20 Mwe	열과 전력	Reactor grade level의 지상 위	Rock cavern	49 feet	88' long 66' high 54' wide
Chooz (Ardennes, France)	226Mwe	전력	지상 위	Rock cavern	-	138' long 146' high 69' wide
Lucerne (Switzerland)	30Mwt/ 8.5Mwe	연구용/전력	Rock cavern	Rock cavern	-	-

그림 1은 지하 원자력 시설의 예시이다[1]. 그림 1에서도 확인할 수 있듯이 지하 원자력 시설은 별도의 격납건물을 필요로 하지 않는다. 원자력 시설을 둘러싸고 있는 주위의 지반이 격납건물의 역할을 충분히 대신하고 있기 때문이다.

지하 원자력 시설의 장단점은 다음과 같이 정리할 수 있다.

### (1) 장점

- 격납 능력의 향상
- 내진 안전성의 향상
- 경제적 이득
- 용이한 폐로(decommission)

### (2) 단점

- 접근성의 감소

## 제 1 절 지하 원자력 시설의 장점

### 1. 격납 능력의 향상

지상 원자력발전소는 중대사고 시 안전을 보장하기 위해 2차 격납시설을 필요로 하고 이것이 우리가 흔히 보는 거대한 격납건물이다. 세계 원전의 60%이상을 차지하고 있는 가압경수로의 경우 격납건물 안에 모든 핵증기 공급계통을 포함하고 있고 (그림 2), 냉각재 상실사고와 같은 대형 사고의 경우에 일차 냉각계통의 모든 가압수가 증기로 방출됨으로 인해 유발되는 최대 압력과 온도를 가정하여 그 크기와 벽두께가 결정되므로 방사성 물질의 외부 누출을 예방하고 그 안전성을 보장할 수 있다. 또한, 격납건물은 중대사고 뿐만이 아니라 지진, 항공기 충돌, 테러와 같은 악의적 공격에 대해서도 내부 시설을 보호하는 역할을 수행하고, 그 중요성은 1986년 구 소련 체르노빌 원자력발전소 사고에서도 확인된 바 있다.

원자력발전소나 연구용원자로를 지하에 건설하면 지반이 격납건물의 역할을 대신할 수 있게 되어 안전성이 대폭 증가하게 된다. 적절한 깊이에 원자력 시설을 격납하고 밀봉을 유지할 수만 있다면 중대사고로 인한 고온고압의 내부하중과 예기치 못한 외부하중으로 인해 방사성 물질이 외부로 누출될 가능성은 아주 희박하게 되어 그 안전성이 충분히 보장되게 된다. 그리고 이러한 안전성은 적절한 긴급 노심냉각 계통, 열제거 및 방사능 제거장치 등을 활용하면 대폭 증가하게 된다.

참고문헌 1에서는 별도의 밀봉을 하지 않았을 경우 원통형 또는 구형의 지하공동구에 작용하는 내압에 의해 지반에 균열이 발생하지 않을 최적의 지하공동구의 깊이를 계산하였다. 지반의 자중에 의한 압축응력과 지하공동구의 내압에 의한 인장응력의 조합에 의해 지반의 응력이 결정되는데 (그림 3), 지하공동구에서부터 지표까지 전구간에 인장응력이 발생하면 균열이 전구간에 걸쳐 진행하게 되고 결국 지하공동구의 물질이 지표로 방출되게 된다. 그래서 지하공동구에서부터 지표까지 전구간에 인장응력만이 발생하지 않도록 최적의 지하공동구의 깊이를 계산한다. 그림 4와 그림 5는 각각 원통형 지하공동구와 구형 지하공동구의 경우에 계산된 최적 깊이의 예시이다.

참고문헌 1에서는 지하 원자력 시설의 밀봉을 위하여 별도의 liner(그림 6)를 사용한 경우 이 liner의 설계를 수행하였다. ACI Code 318-63[2]에 의거하여 설계를 수행하였고, 콘크리트와 철근의 성질, 철근비, 암반의 질, 지진하중, 단면의 형상 등의 영향을 조사하였다. 그림 7은 지하 원자력 시설이 위치한 암반의 질에 따른 천장과 벽에서의 liner 두께를 보여주고 있다. 그림 7에서 RQD(Rock Quality Designation)는 시추조사 시 회수된 코어 중 봉상으로 길이가 100 mm 이상 되는 부분의 총 연장을 굴진 길이로 나누어서 구한 백분율로 정의된다. RQD 값에 따라서 암반의 상태는 매우 좋음(90~100), 좋음(75~90), 보통(50~75), 나쁨(25~50), 매우 나쁨(25 이하)로 분류된다. 그림

7은 이러한 RQD 값에 따른 liner 두께의 변화를 보여주고 있다.

또한 지하 원자력 시설은 사고 시 방사성 물질이 외부로 유출 되는 것을 최소화할 수 있다. 사고가 발생하여 지하 공동구가 고온 고압의 가스로 가득 찬다고 하여도 지반의 열용량은 충분히 크므로 고온의 열을 충분히 흡수할 수 있다. 또한 지반 내 간극의 존재로 인해 지반은 충분한 양의 고압 가스를 흡수할 수 있다. 예를 들면 간극비가 14%인 지반에 반지름이 17m인 지하 공동구가 설치되었을 경우 그 두배의 반지름을 가지는 구의 간극의 부피는 지하 공동구와 같다. 이와 같은 지반의 높은 열 용량과 흡수 능력으로 사고 시 미립자들과 할로젠 등은 지하 공동구 근처의 지반에 흡수 될 수 있다. 또한 사고 시 지반으로 유출된 방사성 물질이 지표까지 도달하는 데 걸리는 시간은 아주 오래 걸리고 방사성 물질의 반감기와 비교하여 보았을 때 지표까지 도달하는 방사성 물질의 양은 아주 작다고 할 수 있다. 그림 8은 지하 공동구에 일정한 압력의 가스가 존재할 때, 가스의 지반 내 진행 거리를 지하 공동구에서의 가스의 압력, 지반의 간극비, 투수계수 등에 따라 조사한 그래프이다. 그림 8에서 확인할 수 있듯이 충분히 깊은 곳에 지하 공동구가 설치되면 사고 시 발생하는 고온 고압의 가스가 지표까지 도달하는 데는 상당한 시간이 소요될 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 8은 단순화된 이상적인 조건에서 계산된 결과이고 실제적인 조건(물질의 확산으로 인한 지하 공동구의 압력 저하, 지반의 간극 등의 영향)을 고려하면 방사성 물질이 지표까지 도달하는 데는 상당한 시간이 소요되고 주변의 인구를 대피시키는데 충분한 시간을 확보할 수 있을 것이다. 이상의 분석은 별도의 밀봉이 이루어지지 않은 지하 공동구에 대한 것으로 만약 충분한 안전시설과 지하 공동구에 대한 밀봉이 이루어진다면 중대 사고 시에도 주변 환경에 대한 영향은 거의 없을 것이다.

이상과 같이 지하 원자력 시설은 별도의 격납시설이 없이도 충분한 격납효과를 발휘하고 이로 인해 그 건설부지에 대한 제약이 없어진다. 보통의 지상 원자력발전소는 핵연료 자체로부터 시작하여 원자로 격납용기까지 다중의 방어벽을 가지고 있지만 사고 시 그 피해의 심각성으로 인해 부지선정은 설계와 허가과정에서 엄격하게 심사된다. 원자력발전소 건설허가 신청 시, 신청자는 그 위치에 발전소를 건설하여 운전하더라도 주민들의 안전과 건강에 부당한 위험을 주지 않고, 환경에도 거의 영향을 주지 않음을 입증하여 규제기관의 승인을 받아야 한다. 하지만, 지하 원자력 시설의 경우에는 충분한 안전시설이 확보가 되면 충분히 안전한 격납효과를 발휘할 수 있으므로 이러한 규제가 약해질 수 있고, 발전시설을 에너지 수요지와 가까운 곳에 위치시킬 수 있다. 그리고 이로 인해 일반적인 지상 원자력발전소에서 송전에 소요되는 비용을 절감하여 경제적인 효과 또한 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

## 2. 내진 안전성의 향상

지진시 지상구조물의 응답은 지반-구조물 상호작용의 영향을 많이 받을 수 있다. 특히, 질량이 큰 대형구조물의 지진응답에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 상대적으로 강성이 작은 지반에 구조물이 위치한 경우 그 영향이 크게 나타날 수 있어, 원자력발전소 격납구조물, 고층빌딩, 장대교량, 댐 등과 같은 구조물의 지진응답 해석 시에는 지반-구조물 상호작용을 반드시 고려하여야 한다. 이러한 지반-구조물 상호작용의 영향은 상호작용력의 역학적 특성에 따라 inertial interaction과 kinematic interaction으로 구분한다(그림 9). 전자는 관성력과 관련된 동적 상호작용이라고 할 수 있으며 후자는 준정적 상호작용이라고 할 수 있다.

하지만 이러한 거동 특성을 보이는 지상구조물과는 달리 지중구조물은 상이한 응답 경향을 보인다. 지상구조물의 경우 질량이 크거나 지반의 강성이 구조물에 비해 상대적으로 작을 경우, 지진 시 구조물의 관성력이 지상구조물의 응답에 큰 영향을 미친다. 그러나, 지상구조물과는 달리 대부분의 지중구조물의 경우에는 주변 매개체가 지반이므로 주변지반에 비해 새로운 거동을 하기보다는 주변지반과 거의 동일한 거동을 나타낸다. 즉, inertial interaction보다는 kinematic interaction의 영향이 크게 나타난다. 또한, 주변지반으로 인해 지중구조물은 큰 radiation damping을 가지므로, 지중구조물의 주변지반에 대한 상대적인 거동도 빨리 감소되는 특성을 가지고 대부분의 지반운동의 크기는 지반깊이에 따라 전반적으로 감소하는 특성을 가진다. 이러한 특성으로 인해 지중구조물은 지상구조물에 비해 지진응답에서 큰 증폭현상이 나타나지 않는다.

이상과 같은 지중구조물의 지진응답특성으로 인해 지하 원자력발전소의 지진응답은 지상 원자력발전소에 비해 큰 증폭현상이 발생하지 않을 수 있고 그 내진안전성 또한 향상될 수 있는 것이다. 하지만 이에 대해서는 좀 더 정밀한 지하 원자력 시설의 지진응답거동 특성에 대한 연구가 필요할 것이다.

## 3. 경제적 이득

지하 원자력 시설을 건설하면 다양한 면에서 비용 절감의 효과를 얻을 수 있다. 우선 지상 원자력발전소와는 달리 별도의 격납건물이 필요하지 않기 때문에 건설비용을 절감할 수 있다. 참고문헌 1에서는 지상 원자력발전소와 지하 원자력발전소의 건설비용을 비교하여 지하 원자력발전소의 건설비용이 Kw 당 최고 지상 원자력발전소의 6~9% 수준임을 보였다. 하지만 이는 특정한 경우에 해당하는 내용이고 실제 소요비용에 대한 비교는 별도의 연구를 통해 많은 사례를 분석하여 이루어져야 할 것이다.

앞에서 언급하였던 격납능력의 향상으로 인해 지하 원자력발전소를 에너지 수요지와 가까운 곳에 위치시키면 이로 인해 일반적인 지상 원자력발전소에서 송전에 소요

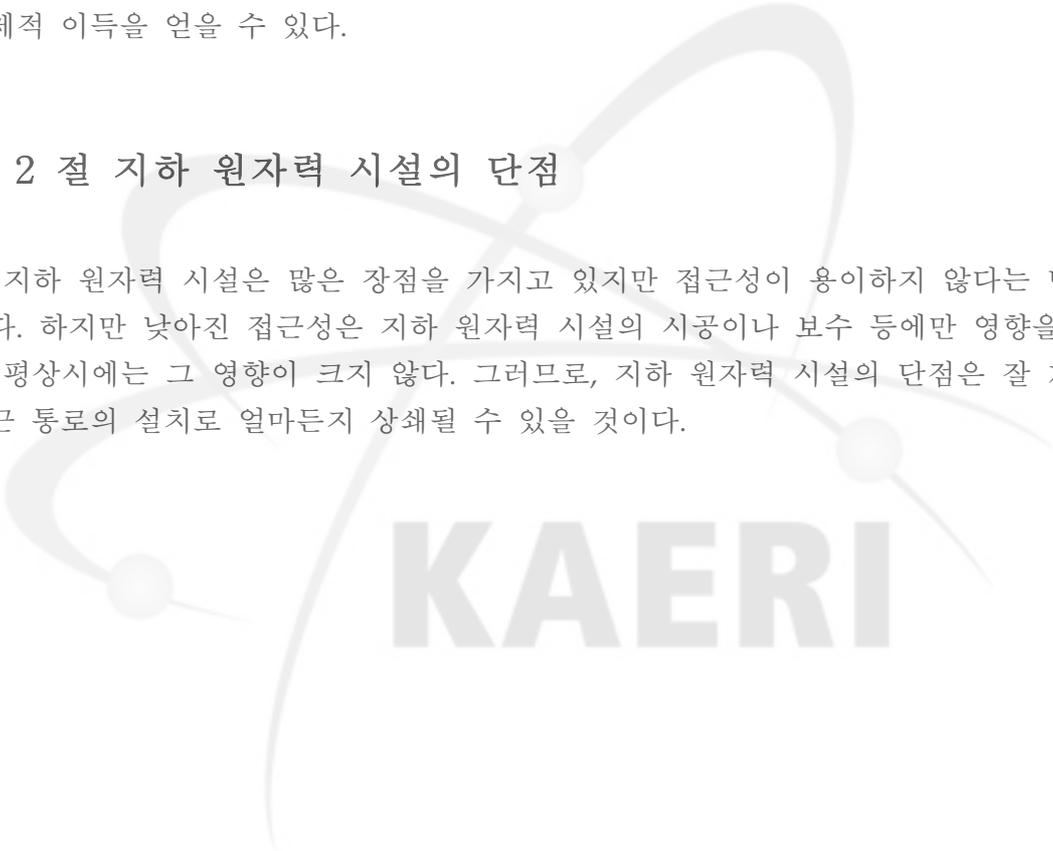
되는 비용을 절감하여 경제적인 효과 또한 얻을 수 있다. 400 km 이상의 송전선 건설 비용은 지상 원자력발전소 자체의 건설비용보다 큰 것으로 평가되는 등 송전에 소요되는 비용을 전체 건설비용에서 무시할 수는 없다. 하지만 지하 원자력발전소의 경우에는 이러한 비용을 상당 부분 절감할 수 있다.

#### 4. 용이한 폐로

지하 원자력 시설은 폐로 후 저준위폐기물 저장소로 활용할 수 있고 시설물 자체가 지하에 위치하기 때문에 폐로 자체가 어렵지 않다. 또한, 지하 원자력발전소의 폐로 비용은 지상 원자력발전소의 1/5~1/10 수준으로 평가되고 이러한 면에서 별도의 경제적 이득을 얻을 수 있다.

### 제 2 절 지하 원자력 시설의 단점

지하 원자력 시설은 많은 장점을 가지고 있지만 접근성이 용이하지 않다는 단점이 있다. 하지만 낮은 접근성은 지하 원자력 시설의 시공이나 보수 등에만 영향을 끼칠 뿐 평상시에는 그 영향이 크지 않다. 그러므로, 지하 원자력 시설의 단점은 잘 계획된 접근 통로의 설치로 얼마든지 상쇄될 수 있을 것이다.



KAERI

## 제 3 장 지하 원자력 시설의 부지 선정 기준

제2장에서 정리한 바와 같이 지하 원자력 시설은 지상 원자력 시설에 비해 다양한 장점을 가지고 있지만, 원자력 시설의 특수성으로 인해 아직은 일반적으로 고려되지 않고 있다. 이 때문에 지하 원자력 시설에 대한 구체적인 기술적 기준 등이 정립되어 있지 않고 있다. 본 장에서는 참고문헌 1에 제안되어 있는 지하 원자력 시설의 부지 선정 기준을 요약, 정리하여 향후 구체적인 기술 기준 정립의 기초를 제공하고자 한다. 구체적인 선정 기준은 다음과 같다.

### (1) 암반의 질

- RQD: RQD가 75% 이상인 양호한 암반이 요구된다. 60% 이하의 RQD를 가지는 불량한 지반은 굴착 비용이 높기 때문에 피해야 한다. 중간 범위의 RQD에 대해서는 조건적으로 수용가능하다.

### (2) 지리적 위치

- 깊이: 지하 원자력 시설은 지표로부터 충분한 깊이에 위치하여야 하고, 이에 대해서는 정밀한 공학적 계산이 수반되어야 한다.
- 냉각수원으로부터의 근접성: 충분한 냉각수를 확보하기 위해 지하 원자력 시설은 해안 등과 같은 냉각수원으로부터 근접해 있어야 한다.
- 지형: 지표면의 지형은 지하 원자력 시설의 부지 선정과는 거의 관계가 없다.

### (3) 지질학적 특성

- 암석 종류: 지하 원자력 시설이 위치할 부지의 암석을 화성암, 퇴적암, 변성암 중의 하나로 한정하지는 않는다. 지질학적 특성보다는 역학적 특성의 균질성이 더 중요하다.
- 지질 구조 응력(tectonic stress): 비정상적인 지질 구조 응력은 피하여야 한다.

### (4) 격납능력

- 간극과 투수성: 10 millidarcies 이하의 낮은 투수계수를 가지고 간극비가 높은 지반을 선정하여야 한다.
- 포화도: 흐르고 있는 대수층은 피하여야 한다.
- 절리: 절리는 비우호적이지만 피할 수는 없다.

### (5) 내진 특성

- 단층: 단층은 부지나 인접 지역을 통과해서는 안 된다.
- 불연속성: 단층과 관련 없더라도 주요한 역학적 불연속성은 피하여야 한다. 예를 들면, 퇴적암과 화성암 경계는 부지를 통과해서는 안 된다.

## 제 4 장 지중구조물의 지진응답해석법

본장에서는 지하 원자력 시설과 같은 지중구조물의 지진응답해석법을 간략히 소개하고자 한다. 지중구조물의 지진응답해석법은 크게 응답변위법, 응답진도법, 동적해석법 등이 있다.

### 제 1 절 응답변위법

응답변위법[3]은 지중구조물의 내진설계를 위하여 1970년대에 일본에서 고안된 방법으로, 구조물의 등가단위중량이 구조물을 둘러싼 지반의 단위중량보다 작거나 같은 경우에 사용하는 내진설계방법이다. 응답변위법은 지진 시 발생하는 지반의 변위를 구조물에 작용시켜서 지중구조물에 발생하는 응력을 정적으로 구하는데, 구조물과 지반의 구조해석모형에 구조물이 없는 자유장 지반에서의 변위, 응력을 입력으로 작용하여 구조해석을 수행한다. 이 방법은 동적인 지반운동을 정적으로 전환하여 지진해석을 한다는 점은 응답진도법과 같으나, 관성력을 구하는 것이 아니라 지진운동으로 인한 주변지반의 변위를 먼저 구하고 주변지반의 변위에 의해 지중구조물에도 거의 같은 변위가 발생한다고 가정하여 이 변위에 의한 구조물의 응력 등을 구하는 방법으로 응답진도법과는 근본적인 차이가 있다.

그림 10에 보인 바와 같이 지중구조물이 없는 자유장 지반의 지진에 의한 응답을  $u_f$ 라 하고 지중구조물이 들어설 위치에 excavation을 한 공동지반의 지진에 의한 응답을  $u_g$ 라 한다. 이때 구조물과 지반의 경계를 형성하게 될 공동지반의 경계는 자유표면이 되므로 응력이 0이다. 응답변위법은 지반에 위치한 지중구조물에  $u_g$ 를 가해서 지중구조물에 발생하는 응답을 구하는 방법이다. 하지만 일반적으로 공동지반의 응답  $u_g$ 를 구하는 것은 매우 복잡한 과정을 거쳐야 하므로 쉽지 않은 작업이다. 그래서  $u_g$  대신 계산하기 쉬운 자유장 지반의 응답  $u_f$ 를 구조물에 가하여 지중구조물의 지진응답을 구하는 것이다. 일반적으로 자유장 지반은 단순한 형상을 가지고 있으므로  $u_f$ 를 구하는 것은 계산 면에서 큰 이득이다. 하지만 공동지반에  $u_f$ 를 가하게 되면 공동지반 경계에서의 자유표면 조건이 위배되게 된다. 즉,  $S_g(u_f - u_g)$  만큼의 외력이 작용하게 되어 더 이상 자유표면이 되지 않는 것이다. 여기서  $S_g$ 는 공동지반의 동적강성이다. 공동지반 경계에서의 자유표면 조건을 만족시키기 위해서는  $-S_g(u_f - u_g) = S_g u_f$ 의 외력을 별도로 가하여야 하고(공동지반에서 별도의 외력이 가해지지 않으므로  $S_g u_g = 0$ 이다.) 이는 곧 자유장 지반에서 향후 구조물과 지반의 경계면을 형성할 면에서 발생하는 응력을 반대로 가하는 것을 의미한다.

## 제 2 절 응답진도법

응답진도법[4]은 지진에 의해 발생하는 구조물(또는 지반)의 각 위치에서 최대가속도가 주어질 때, 각 절점의 질량에 주어진 가속도를 곱한 값을 지진방향의 정적하중으로 작용하여 지진응답해석을 수행하는 방법으로, 지중구조물인 경우에는 구조물과 구조물 주변의 지반을 모두 모형화한 다음 깊이로 따라 부지응답해석을 통해 구한 최대 지반가속도(절대가속도)를 지진방향으로 작용하여 적용한다.

응답진도법의 이론을 쉽게 설명하기 위하여, 먼저 그림 11과 같은 종방향 단위길이의 콘크리트 암거와 단위 폭의 균등 인접지반층으로 구성된 평면변형률상태의 2차원 시스템을 고려하자. 이 지반-구조물 시스템의 동적거동은 전단변형이 지배적이라고 가정할 수 있다. 해석모델 바닥의 수평운동  $\ddot{u}_g(t)$ 를 입력으로 한 지반-구조계의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$ 는 각각 구조물의 질량, 감쇠, 강성 행렬이고,  $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ ,  $\dot{\mathbf{u}}(t)$ ,  $\mathbf{u}(t)$ 는 각각 구조물의 가속도, 속도, 변위 벡터이다. 그리고  $\mathbf{r}$ 은 지진의 영향을 나타내는 영향 벡터(influence vector)이다.

이 시스템에서 지중구조물이 차지하는 전체 면적에 대해 무게와 강성을 균등하게 재분배하여 구한 구조물의 감소된 비중과 강성은 일반적으로 인접지반의 비중 및 강성과 비슷하다. 따라서, 이 시스템을 실제의 암거를 무시하고 지반층으로만 구성되어 있다고 가정하면, 이 문제는 균등지반의 자유장응답을 구하는 문제와 동일하다.

식 (1)의 시스템의 운동방정식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\mathbf{K}\mathbf{u}(t) = -\mathbf{M}[\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{r}\ddot{u}_g(t)] - \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) \quad (2)$$

여기서, 우변은 전체 시스템에 작용하는 동적 하중이다. 만일 우변의 동적 하중을 식 (1)의 동해석을 수행하지 않고 합리적인 가정을 통해 미리 결정한다면, 결국 식 (2)는 정해석을 수행하는 것과 같은 의미를 가지게 된다. 지반의 감쇠가 작아 무시할 수 있고,  $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ 를 자유장해석에 의한 상대변위로 근사할 수 있다면 식 (2)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\mathbf{K}\mathbf{u}(t) = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_f(t) \quad (3)$$

식 (3)으로부터  $\mathbf{u}(t)$ 와 이에 대응하는 응력을 정해석을 통해 근사적으로 구하는 방법이

응답진도법이다.

### 제 3 절 동적해석법

지중구조물은 지상구조물과는 달리 입력되는 지반운동에 비해 동적응답이 크게 증폭하지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서 지중구조물의 내진설계를 위한 구조해석법으로 응답변위법 또는 응답진도법이 널리 사용되어 왔다. 그러나 이 방법들은 근사적인 방법으로 엄밀한 해석법이 아니다. 최근에는 컴퓨팅 기술의 발달로 인해 지중구조물 또는 주변 지반의 재료 비선형성, 구조물과 지반이 접하는 경계면의 일시적인 분리 등과 같은 경계 비선형성을 고려한 엄밀한 지진응답해석이 현실화 되고 있다. 엄밀한 동적해석법은 시간에 따른 구조물(또는 지반)의 응답을 구하는 구조해석방법으로, 구조물에 작용하는 모든 힘(관성력, 감쇠력, 복원력, 외력)이 평형을 이룬다는 조건과 구조물이 진동을 하기 시작하는 시점에서의 초기조건을 이용하여 구조물의 시간에 따른 응답을 구하는 방법이다. 동적해석법은 시간영역해석과 주파수영역해석으로 수행되며, 구조물 및 주변지반을 동역학 모델로 바꿔놓고 이것에 지진을 입력하여 구조물의 응답을 동적으로 구하는 것이므로, 상대적으로 해석이 어렵고 많은 시간이 소요된다.

지중구조물의 동적해석을 정확하게 수행하려면 구조물의 동적특성뿐만 아니라 구조물 주변지반의 특성도 정확하게 모델링하여 지반-구조물 상호작용(soil-structure interaction, SSI) 효과를 잘 표현하여야 한다. 일반적으로 SSI 효과는 원자력 발전소 격납구조물, 고층빌딩, 장대교량, 댐 등과 같은 질량이 큰 대형 구조물의 지진응답에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 상대적으로 강성이 작은 지반에 구조물이 위치한 경우 그 영향이 크게 나타난다. 지진응답해석시 SSI 효과를 고려할 경우 고려하지 않는 사례의 동적해석법에 비해 구조물의 응답이 증폭되기도 하고 감소되기도 하므로, 최근에는 지중구조물의 보다 안전한 설계 또는 보다 경제적인 설계를 위해서 SSI를 고려하여 동적해석을 수행하는 사례가 늘고 있다.

여기서는 그림 12와 같이 간단한 지반-구조물 상호작용계의 기본적인 운동방정식을 유도하고자 한다[5]. 지진과 입사 이외의 외력이 작용하지 않는 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_{ss}^s & \mathbf{S}_{sb}^s \\ \mathbf{S}_{bs}^s & \mathbf{S}_{bb}^s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s^t \\ \mathbf{u}_b^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{P}_i^s \end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{S}$ 는 동적강성,  $\mathbf{u}^t$ 는 total 변위,  $\mathbf{P}_i^s$ 는 구조물에 작용하는 구조물과 지반 간의 상호작용력을 의미한다. 아래첨자 b는 구조물과 지반의 경계면에 위치한 절점, s는 그 이외의 구조물의 절점을 의미하고 위첨자 s는 구조물을 의미한다. Excavation이 있는 지반에 지진파가 입사할 때(그림 12), 지반의 변위는  $\mathbf{u}_b^g$ 로 주어지고, 절점 b가 위치하

는 구조물과 지반의 경계면은 자유표면이 되므로 아무런 외력이 작용하지 않게 된다. 그러므로 구조물이 존재할 때, 지반에 작용하는 구조물과 지반 간의 상호작용력  $\mathbf{P}_i^g$ 는  $\mathbf{u}_b^g$ 의 상대운동에 좌우되게 되고  $\mathbf{S}_{bb}^g(\mathbf{u}_b^t - \mathbf{u}_b^g)$ 로 주어지게 된다.  $\mathbf{P}_i^s + \mathbf{P}_i^g = \mathbf{0}$ 이므로 식 (4)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_{ss}^s & \mathbf{S}_{sb}^s \\ \mathbf{S}_{bs}^s & \mathbf{S}_{bb}^s + \mathbf{S}_{bb}^g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s^t \\ \mathbf{u}_b^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{S}_{bb}^g \mathbf{u}_b^g \end{Bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)에서 지진의 영향은  $\mathbf{u}_b^g$ 에 의해서 표현되게 된다. 그러나 산란운동  $\mathbf{u}_b^g$ 는 구하기가 어려우므로,  $\mathbf{u}_b^g$ 의 영향을 계산하기 쉬운 자유장운동  $\mathbf{u}_b^f$ 로 표현하는 것이 더 낫다. 그림 13의 자유장은 excavation이 있는 지반에 excavated soil을 더하면 얻어진다. 즉,  $\mathbf{S}_{bb}^e + \mathbf{S}_{bb}^g = \mathbf{S}_{bb}^f$ 이다. Excavated soil을 구조물로 간주하면,  $\mathbf{S}_{bs}^s = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{S}_{bb}^s = \mathbf{S}_{bb}^e$ ,  $\mathbf{u}_b^t = \mathbf{u}_b^f$ 이므로 식 (5)는 다음과 같이 표현된다.

$$(\mathbf{S}_{bb}^e + \mathbf{S}_{bb}^g) \mathbf{u}_b^f = \mathbf{S}_{bb}^f \mathbf{u}_b^f = \mathbf{S}_{bb}^g \mathbf{u}_b^g \quad (6)$$

그러므로, 최종적인 지반-구조물 상호작용계의 운동방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_{ss}^s & \mathbf{S}_{sb}^s \\ \mathbf{S}_{bs}^s & \mathbf{S}_{bb}^s + \mathbf{S}_{bb}^g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s^t \\ \mathbf{u}_b^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{S}_{bb}^f \mathbf{u}_b^f \end{Bmatrix} \quad (7)$$

식 (7)로부터 지반-구조물 상호작용계의 동적해석을 수행하기 위해서는  $\mathbf{S}_{bb}^g$ ,  $\mathbf{S}_{bb}^f$ ,  $\mathbf{u}_b^f$ 를 결정하면 된다는 것을 알 수 있다. 그러므로, 전달경계, 경계요소, 무한요소 등의 방법을 사용하여  $\mathbf{S}_{bb}^g$ 를 결정하고, 자유장 해석을 수행하여 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하게 된다.

## 제 5 장 지하공동구 내진설계기준

지진대책의 일환으로 지하공동구의 안전성을 강화하여, 지진 발생 시 공동구내에 수용하고 있는 전기, 수도, 통신시설의 피해를 방지하고, 도시 기능이 평시와 같이 정상적으로 작동하도록 하기 위하여 지하공동구 내진설계기준[6]이 2004년 건설교통부에 의해 제정되었다. 이 기준에는 지하공동구의 내진등급, 내진성능목표, 설계거동한계 등의 기본개념과 지하공동구 건설지점의 액상화 간이평가 및 상세평가방법, 설계지반진동, 설계하중 및 하중조합법, 종·횡단방향의 지진응답해석방법 등의 구체적인 내진설계방법을 제시함으로써 관련업무에 참여하는 실무자들에게 쉬운 이해와 편의를 제공하고 있다. 이 기준을 간단히 요약하여 정리하면 다음과 같으며, 원자력 분야에 적용할 수 있는 설계 시준에 대한 연구가 선행되어야 할 것이다.

### 제 1 절 설계 일반사항

#### 1. 지하공동구의 내진등급

지하공동구의 내진등급은 내진설계성능기준 작성준칙에 의거하여 구조물의 중요도, 인명 피해 여부 및 피해규모 정도를 기준으로 하여 내진 1등급으로 규정한다. 다만, 폭발성 물질을 보관하는 건축물이나 시설물과 방송국 등과 같은 내진 특등급에 해당하는 건축물의 기능에 직접적인 영향을 줄 것으로 예상되는 지하공동구의 경우에는 내진 특등급으로 규정할 수 있다.

#### 2. 지하공동구의 내진성능목표

내진성능목표 상위개념인 내진설계성능기준 작성준칙에 따라 본 설계기준에서도 가스·석유, 상수도, 전력·통신 등의 수송기능을 유지하는 한도에서의 부분적인 피해를 허용하는 기능수행수준과, 내부시설물이 그 기능을 상실하더라도 신속하고 경제적인 보수가 가능하도록 허용하는 붕괴방지수준의 두 가지 성능수준을 확보하도록 한다. 표 2는 재현주기에 따른 지하공동구의 내진등급 및 내진성능수준을 나타낸 것이다.

표 2. 내진성능목표

재현주기	성능수준	기능수행수준	붕괴방지수준
100년		내진1등급	
200년		내진특등급	
1000년			내진1등급
2400년			내진특등급

### 3. 지하공동구의 설계거동한계

지하공동구가 보유해야하는 내진성능은 피해를 입은 지역의 사회적 경제적 영향 등을 종합적으로 감안하여 결정되어지며, 성능수준에 따른 지하공동구의 설계거동의 한계는 표 3과 같다.

표 3. 설계거동한계

피해구분	피해 세부사항	
	기능수행수준	붕괴방지수준
허용되는 피해	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 시설물의 미세한 균열</li> <li>· 미세한 지반침하</li> <li>· 구조물의 미세한 변형</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 시설물의 미세한 균열</li> <li>· 미세한 지반침하</li> <li>· 구조물의 미세한 변형</li> <li>· 전체 구조물의 안전에 관계없는 2차부재의 파괴</li> </ul>
허용되지 않는 피해	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 허용변위를 초과하는 변위</li> <li>· 과잉간극수압에 의한 액상화</li> <li>· 편토압에 의한 시설물의 절대위치 변화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 구조물 내부의 수용시설에 대한 피해</li> <li>· 과잉간극 수압에 의한 액상화</li> <li>· 지반침하에 의한 주변 시설물의 붕괴나 과도한 침하</li> </ul>

## 제 2 절 내진설계방법 및 지진응답해석법

### 1. 내진설계의 기본방침

지하공동구의 내진설계는 다음과 같은 주요 절차를 따른다.

- (1) 건설지점의 선정
- (2) 구조물의 중요도에 따른 등급결정
- (3) 건설지점의 지반조사
- (4) 구조형식 및 단면가정
- (5) 지진응답해석법의 결정
- (6) 설계하중의 산정
- (7) 구조해석
- (8) 단면설계
- (9) 안정성 검토
- (10) 단면결정 및 세부설계

본 설계기준의 내진설계절차에서는 지반의 액상화를 허용하지 않으며 콘크리트 구조물은 강도설계법에 따라 설계하는 것을 원칙으로 한다. 지반의 액상화평가에 관한 상세절차가 설계기준에 별도로 제시되어 있으며, 액상화가 발생 가능한 경우에는 액상화 방지대책을 통해 액상화 가능성을 차단하고 내진설계를 실시한다. 이상의 내진설계 절차를 수행 순서에 따라 간략히 나타내면 그림 14와 같다.

### 2. 지반조사 및 지반분류

#### 2.1 지반조사

내진설계시 설계자는 구조물의 지진응답산정에 필요한 지반물성을 파악하기 위하여 지반조사를 실시해야 한다. 지반조사는 지층의 구성, 각 지층의 역학적 특성과약 및 실내실험용 시료채취 등을 수행하는 현장시험과 채취된 시료를 이용한 실내실험을 포함한다. 내진설계시 필요한 지반자료는 다음과 같다.

- (1) 시추를 통한 지반의 층상구조, 간극비, 밀도 및 지하수위
- (2) 현장에서 탄성파시험을 통하여 각 지층의 전단파속도 및 압축파속도 주상도
- (3) 실내실험을 수행하여 변형률 크기에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비의 변화, 액상화 관련계수

## 2.2 기반면 설정 및 기반지반의 분류

건설지점에 대한 지반조사 결과를 이용하여 지하공동구 구조물의 바닥면 보다 깊은 위치에 지진입력의 기준점이 되는 기반면을 정한다. 그리고 기반지반(기반면 보다 깊은 지층)에 대한 지반조사 결과를 이용하여 표 3과 같이 6종으로 기반지반을 분류한다. 기반지반은 표 4에 따라 분류할 때 견고한 지반( $S_A$ ,  $S_B$  또는  $S_C$ )이어야 한다. 이와 같이 분류된 기반지반은 기반면에 대한 설계가속도응답스펙트럼을 결정할 때 사용한다.

표 4. 기반지반의 분류

지반 종류	지반종류의 호칭	상부 30.5m에 대한 평균 지반특성		
		전단파속도 (m/sec)	표준관입시험 N값 (blow/foot)	비배수 전단강도, $s_u$ (kPa)
$S_A$	경암지반	1500 초과	-	-
$S_B$	보통암지반	760 ~ 1500		
$S_C$	매우 조밀한 토사지반 및 연암지반	360 ~ 760	> 50	> 100
$S_D$	단단한 토사지반	180 ~ 360	15 ~ 50	50 ~ 100
$S_E$	연약한 토사지반	180 미만	< 15	< 50
$S_F$	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

## 3. 설계지반진동

지하공동구의 내진설계에 있어서 지진하중의 산정을 위한 설계응답스펙트럼을 결정하기 위해서는 먼저 건설지점의 지진재해도와 구조물의 성능목표에 따른 지역계수( $Z$ )와 위험도계수( $I$ )를 정한다. 그리고 제2.2절 “기반면 설정 및 기반지반의 분류”에 명시된 기준에 따라 설계기반면을 결정하고 기반지반에 대한 지반분류를 수행해야 한다. 마지막으로 분류된 기반지반의 종류와 지진구역에 따른 지진계수( $C_a$  및  $C_v$ )를 구하여 설계응답스펙트럼을 결정한다. 동적해석법을 적용할 경우 설계가속도응답스펙트럼에 준하는 가속도 시간이력을 작성하여 사용하여야 하며, 제3.3절 “가속도 시간이력”에 제시된 요건을 만족하여야 한다.

### 3.1 기반면 설계지반운동 수준

기반면에서 설계지반운동의 수준은 다음과 같은 기준으로 결정한다.

- (1) 지진재해도해석 결과에 근거하여 표 5에 기술된 바와 같이 우리나라의 경기도와 강원도 남쪽을 두 개의 지진구역으로 설정한다. 각 지진구역에서의 평균재현주기 500년 지진지반운동에 해당하는 지진구역계수  $Z$ 는 표 6에 수록된 바와 같으며 지진구역 I에서는 0.11, 지진구역 II에서는 0.07 이다.

표 5. 지진구역 구분

지진구역	행정구역	
	I	시
도		경기, 강원 남부 <sup>(1)</sup> , 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남 북동부 <sup>(2)</sup>
II	도	강원 북부 <sup>(3)</sup> , 전남 남서부 <sup>(4)</sup> , 제주

- 주 : (1) 강원도 남부(군,시) : 영월군, 정선군, 강릉시, 동해시, 삼척시, 원주시, 태백시  
 (2) 전라남도 북동부(군,시) : 구례군, 곡성군, 담양군, 보성군, 장성군, 장흥군, 화순군, 광양시, 나주시, 순천시, 여수시  
 (3) 강원도 북부(군,시) : 고성군, 양구군, 인제군, 철원군, 평창군, 화천군, 홍천군, 횡성군, 양양시, 속초시, 춘천시  
 (4) 전라남도 남서부(군,시) : 강진군, 고흥군, 무안군, 신안군, 영암군, 완도군, 영광군, 진도군, 함평군, 해남군, 목포시

표 6. 지진구역계수  $Z$  (재현주기 500년에 해당)

지진구역	I	II
구역계수, $Z$ ( $g$ 값)	0.11	0.07

- (2) 평균재현주기별 최대유효가속도의 비를 의미하는 위험도계수는 표 7과 같다. 이 표는 평균재현주기 500년 지진을 기준으로 작성되었다.

표 7. 위험도계수  $I$

재현주기 (년)	50	100	200	500	1000	2400
위험도 계수, $I$	0.40	0.57	0.73	1.00	1.40	2.00

- (3) 시설물이 건설될 부지에 대한 지진재해도를 정밀하게 평가하고자 할 경우에는 내진설계기준연구[6]에 제시된 등고선 형태의 지진재해도가 사용될 수 있다.

### 3.2 기반면에서의 설계응답스펙트럼

- (1) 설계지반운동의 크기와 주파수특성은 설계자가 정한 자유장지반의 기반면에 대한 설계가속도응답스펙트럼으로 표현한다.
- (2) 위험도계수가 1.0일 때, 5% 감쇠비에 대한 설계가속도응답스펙트럼의 형상은 그림 15와 같다.
- (3) 그림 15에서 설계가속도응답스펙트럼의 적용을 위해 요구되는 지진계수  $C_a$ 와  $C_v$ 의 값은 표 8과 같다.

표 8. 지진계수  $C_a$  및  $C_v$

지반종류	지진계수 $C_a$		지진계수 $C_v$	
	지진구역 I	지진구역 II	지진구역 I	지진구역 II
$S_A$	0.09	0.05	0.09	0.05
$S_B$	0.11	0.07	0.11	0.07
$S_C$	0.13	0.08	0.18	0.11
$S_D$	0.16	0.11	0.23	0.16
$S_E$	0.22	0.17	0.37	0.23

### 3.3 가속도 시간이력

동적해석을 위한 기반면에서 가속도 시간이력은 설계가속도응답스펙트럼에 상응하도록 작성하여야 하며 다음 조건을 만족하여야 한다.

- (1) 지진지속시간과 강진지속시간은 표 9의 조건을 만족해야 한다.
- (2) 시간이력의 개수는 설계응답스펙트럼을 만족하기 위하여 10개 이상의 가속도 시간이력을 사용해야 한다.
- (3) 가속도 시간이력을 이용하여 구한 5% 감쇠비에 대한 메디안 가속도응답스펙트럼이 지하공동구 구조물의 지진응답에 영향을 주는 주요 진동수범위에서 설계가속도응답스펙트럼 보다 크거나 같도록 해야 한다. 이때 지하공동구 구조물의 지진응답에 영향을 주는 주요 진동수( $f$ )의 범위는  $0 < f \leq \frac{2}{T_{Dg}}$  이다.

표 9. 가속도 시간이력의 지진 지속시간 및 강진 지속시간 요구조건

성능목표	지진 지속시간	강진 지속시간
기능수행수준	11초 이상	5초 이상
붕괴방지수준	18초 이상	7초 이상

## 4. 설계하중 및 하중조합

### 4.1 설계하중

지하공동구의 내진설계시 고려해야 하는 설계하중은 다음과 같다.

- (1) 고정하중 ( $D$ )
- (2) 활하중 ( $L$ )
- (3) 토압 ( $P$ )
- (4) 수압 ( $H$ )
- (5) 부력 ( $Q$ )
- (6) 지진하중 ( $E$ )

여기서 지진하중( $E$ )은 수평동토압( $EE$ )과 주면전단력( $ES$ ) 및 구조물의 관성력( $EI$ )을 합한 하중이다.

### 4.2 하중조합

지하공동구의 내진설계시 내진성능목표를 만족하기 위하여 다음과 같은 하중조합을 사용하여 설계하도록 한다.

#### 4.2.1 기능수행수준

기능수행수준에 대한 하중조합은 다음과 같다.

$$U = 0.75 (1.4D + 1.7L + 1.8P + 1.8H + 1.8Q + 1.8E) \quad (7)$$

그리고 고정하중이 지배적인 지하공동구에 대해서는 고정하중( $D$ )을 10% 할증하여 적

용하며 이때 활하중( $L$ )이 영(0)인 경우도 고려한다.

#### 4.2.2 붕괴방지수준

붕괴방지수준에 대한 하중조합은 다음 중에서 하나를 택하여 수행할 수 있다.

- (1) 다음 하중조합에 대하여 선형탄성해석에 의해 구조해석을 수행하고 강도설계법에 의하여 단면을 설계하면 붕괴방지수준의 성능을 확보한 것으로 한다.

$$U = 1.0 (D + L + P + H + Q + E) \quad (8)$$

- (2) 지진하중에 대하여 응답수정계수( $R$ )를 적용한 다음의 하중조합에 대하여 강도설계법에 의해 설계한다. 구조해석은 선형탄성해석에 의해 수행한다.

$$U = 1.0 (D + L + P + H + Q + \frac{1}{R} E) \quad (10)$$

응답수정계수( $R$ )는 휨모멘트 계산에는 3.0 을 적용하며 축력과 전단력 계산에는 1.0을 적용한다. 식 (10)을 적용할 때는 반드시 본 설계기준에 명시된 내진설계 구조상세를 따라야만 붕괴방지수준의 성능을 확보한 것으로 한다.

### 5. 지진응답해석법

지하공동구의 지진응답해석은 설계단면의 횡단방향과 종단방향에 대해 각각 수행되어야 한다. 단면 방향별 적용 가능한 해석방법은 표 10과 같다.

표 10. 지하공동구의 지진응답해석법

지진응답해석 단면	지진응답해석법	지진입력 성분
횡단방향	응답변위법	수평성분
	응답진도법	
	동적해석법	
종단방향	응답변위법	수평 및 수직성분
	동적해석법	

박스단면인 경우 표 9의 해석방법 중 설계결과의 보수성과 설계자의 편리성을 고려하여 응답변위법을 적용함을 원칙으로 한다. 단, 설계자의 판단에 따라 응답변위법

보다 정밀한 해석방법(응답진도법 또는 동적해석법)을 적용할 수 있다. 응답변위법을 적용할 경우 설계기준에 제시되어 있는 박스단면의 응답변위법에 의한 해석을 따른다.

분기지점, 환기구, 작업구의 지진응답해석은 설계자의 판단에 따라 표 9에 제시된 방법 중 하나를 적용할 수 있다. 각 해석방법은 안전측 해석결과가 확보될 수 있는 범위에서 설계자의 판단에 따르며 구조물 거동의 3차원 효과를 고려하여야 한다.

### 제 3 절 상세 내진설계에 관한 내용

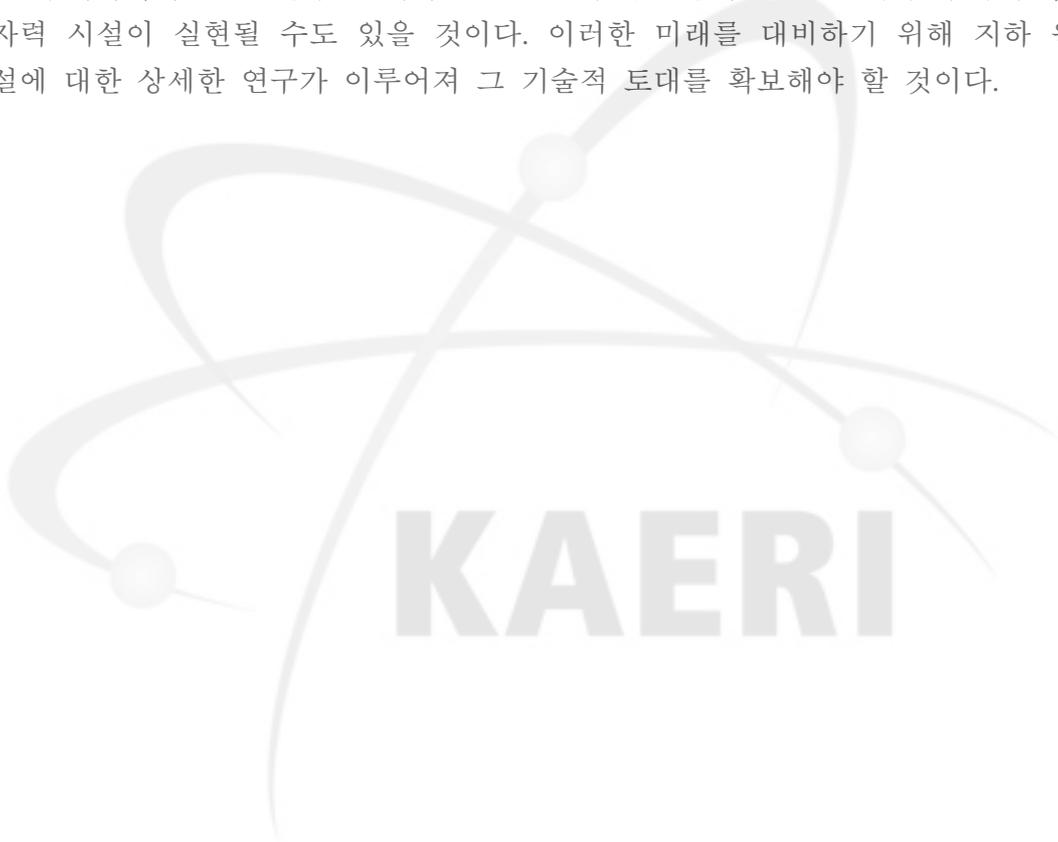
이상과 같은 내진설계에 관한 기본적인 개념 외에도 참고문헌 6의 “지하공동구 내진설계기준”에는 다음과 같은 내용이 상세히 수록되어 있다.

- (1) 박스단면의 응답변위법에 의한 해석법: 박스단면의 경우는 설계결과와 보수성과 설계자의 편리성을 고려하여 응답변위법을 적용함을 원칙으로 한다. 단, 설계자의 판단에 따라 응답변위법보다 정밀한 해석방법(응답진도법 또는 동적해석법)을 적용할 수 있다.
- (2) 국내에 적합한 액상화 간이평가 및 상세평가방법과 액상화 대책공법: 액상화 저항응력비와 지진에 의해 발생하는 전단응력비로서 정의되는 안전율을 사용하여 지하공동구 내진설계를 위한 액상화를 평가한다.
- (3) 콘크리트박스의 상세설계법: 지하공동구의 콘크리트박스구조물에 대한 배근설계는 기본적으로 콘크리트구조설계기준[8]의 제반 관련규정을 적용하고, 내진설계를 위해 추가로 반영되어야 할 지하공동구 콘크리트박스의 상세설계 사항들이 기술되어 있다.

## 제 6 장 결 론

본 연구에서는 지하 원자력발전소나 지하 연구용원자로와 같은 지하 원자력 시설의 장점을 지상 원자력 시설과 비교하여 검토하였다. 또한, 지하구조물 또는 지중식 구조물의 구조해석 방법 중 응답변위법, 응답진도법, 동적해석법에 대해 정리하고 현재 우리나라에서 적용되고 있는 지하공동구 내진설계기준에 대해 요약하였다.

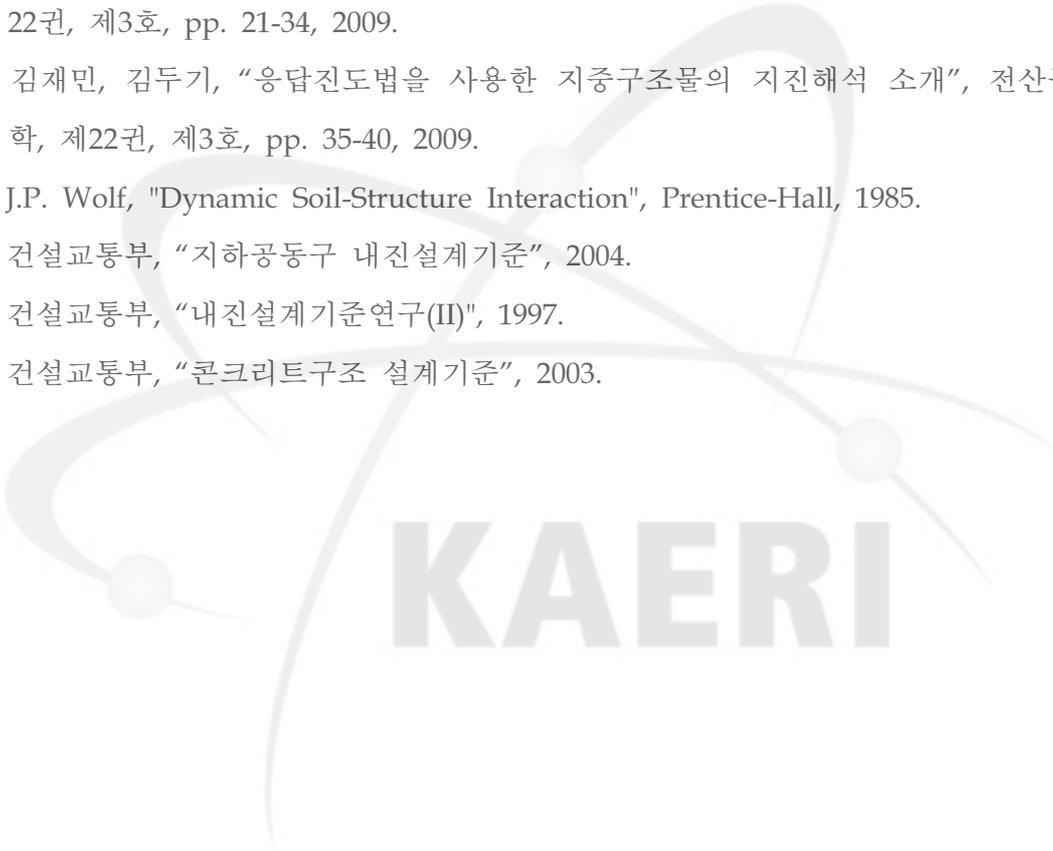
지하 원자력 시설은 격납능력의 향상, 내진안전성의 향상, 경제적 이득, 용이한 폐로와 같은 장점을 분명히 가지고 있다. 그러나 이에 대한 연구는 국내에서는 이루어진 적이 없고, 국외에서도 기초적인 연구밖에 이루어지지 않았다. 한정된 공간을 가지고 있는 우리나라와 같은 경우는 지하공간 활용의 중요성이 앞으로 더욱 부각되고, 지하 원자력 시설이 실현될 수도 있을 것이다. 이러한 미래를 대비하기 위해 지하 원자력 시설에 대한 상세한 연구가 이루어져 그 기술적 토대를 확보해야 할 것이다.



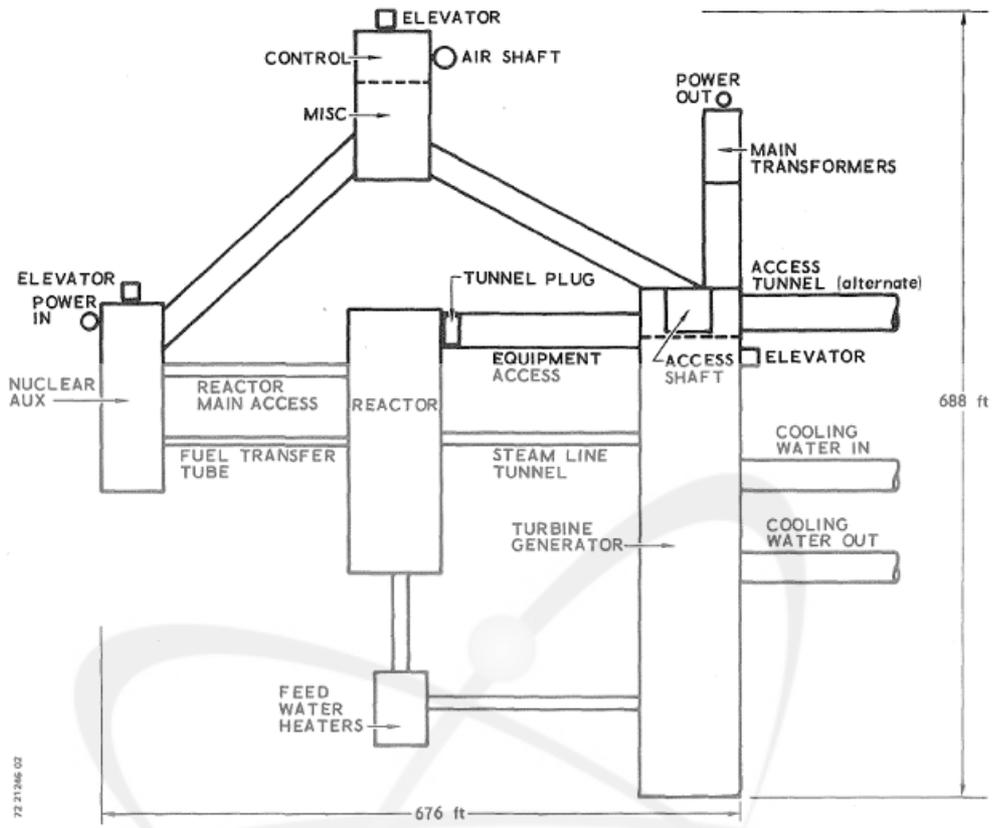
KAERI

## 참 고 문 헌

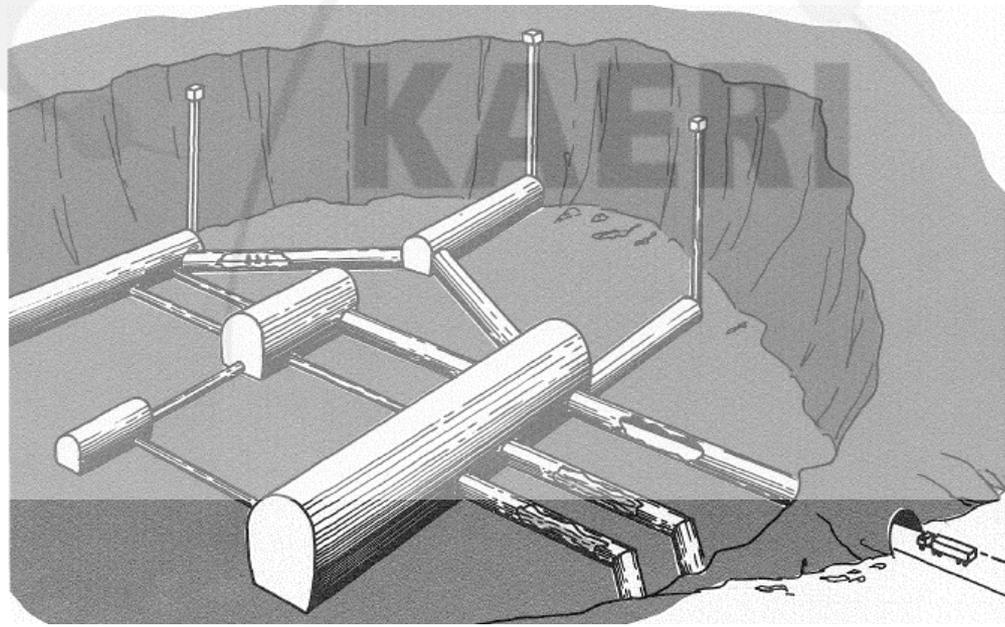
- [1] M.B. Watson, W.A.Kammer, N.P.Langley, L.A. Selzer and R.L. Beck, the Aerospace Corporation, EQL Report No. 6, "Underground Nuclear Power Plant Siting", 1972.
- [2] ACI Committee 318, "Building code requirements for reinforced concrete (ACI 318-63)", American Concrete Institute, 1963.
- [3] 이병로, 김두기, "응답변위법을 사용한 지중구조물의 지진해석", 전산구조공학, 제 22권, 제3호, pp. 21-34, 2009.
- [4] 김재민, 김두기, "응답진도법을 사용한 지중구조물의 지진해석 소개", 전산구조공학, 제22권, 제3호, pp. 35-40, 2009.
- [5] J.P. Wolf, "Dynamic Soil-Structure Interaction", Prentice-Hall, 1985.
- [6] 건설교통부, "지하공동구 내진설계기준", 2004.
- [7] 건설교통부, "내진설계기준연구(II)", 1997.
- [8] 건설교통부, "콘크리트구조 설계기준", 2003.



KAERI



(a) 평면도



(b) 투시도

그림 1. 지하 원자력 시설 예시

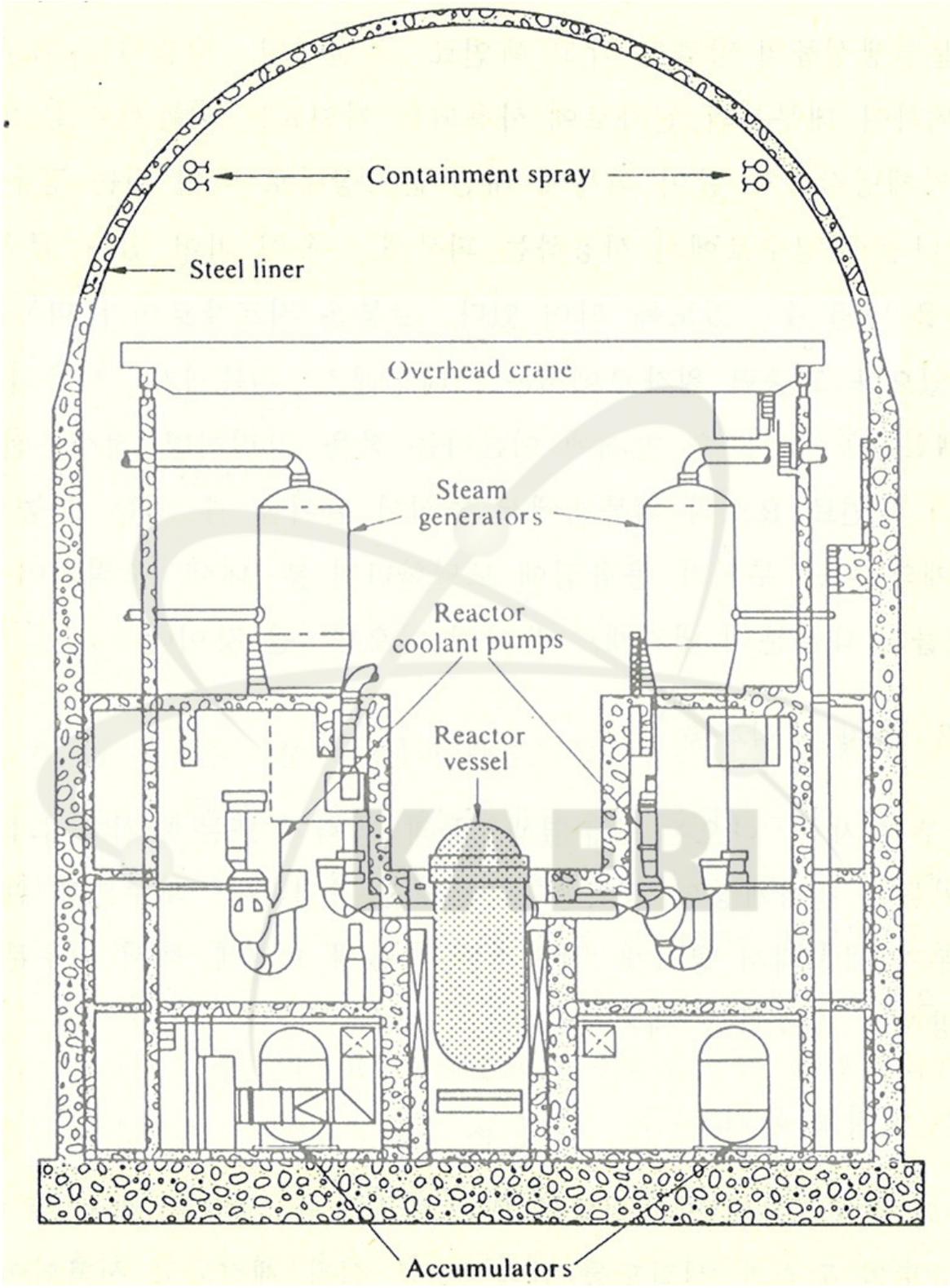


그림 2. 가압경수로의 격납용기

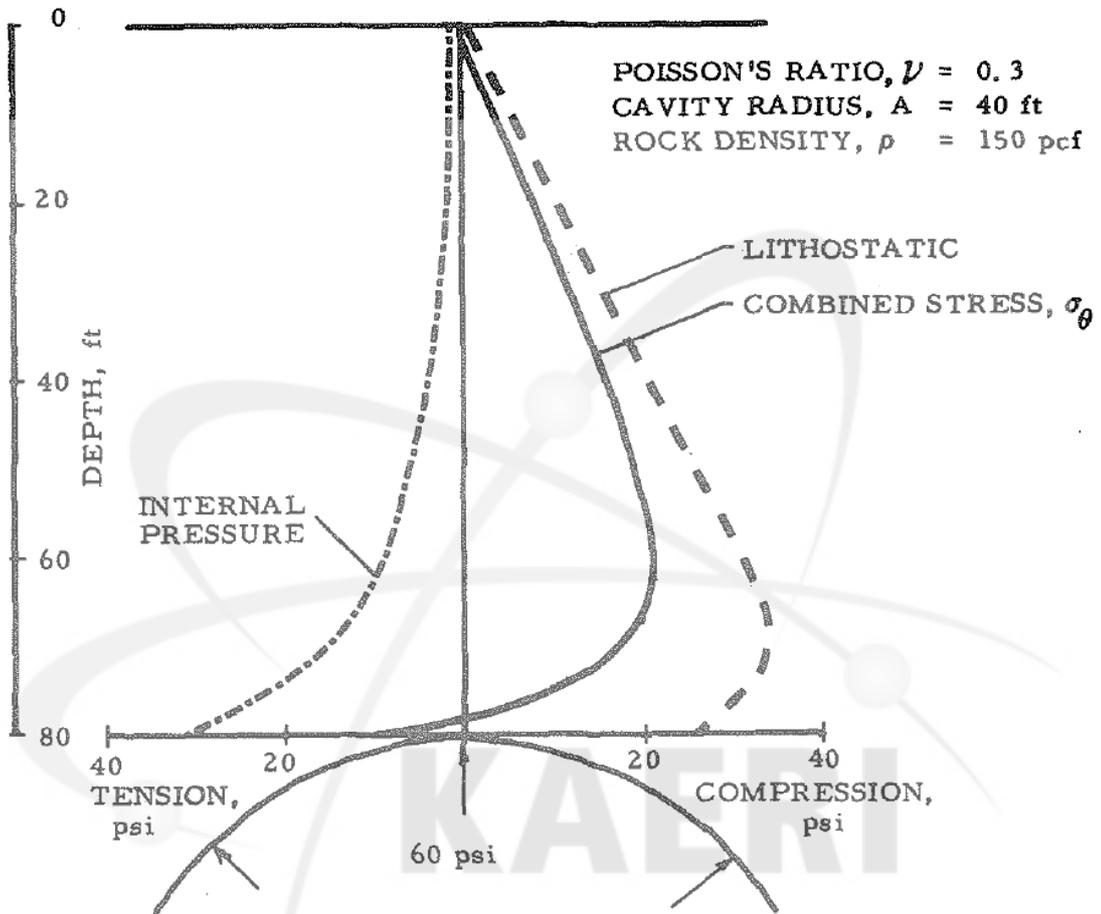


그림 3. 내압을 받는 지하공동구가 위치한 지반에서의 응력분포

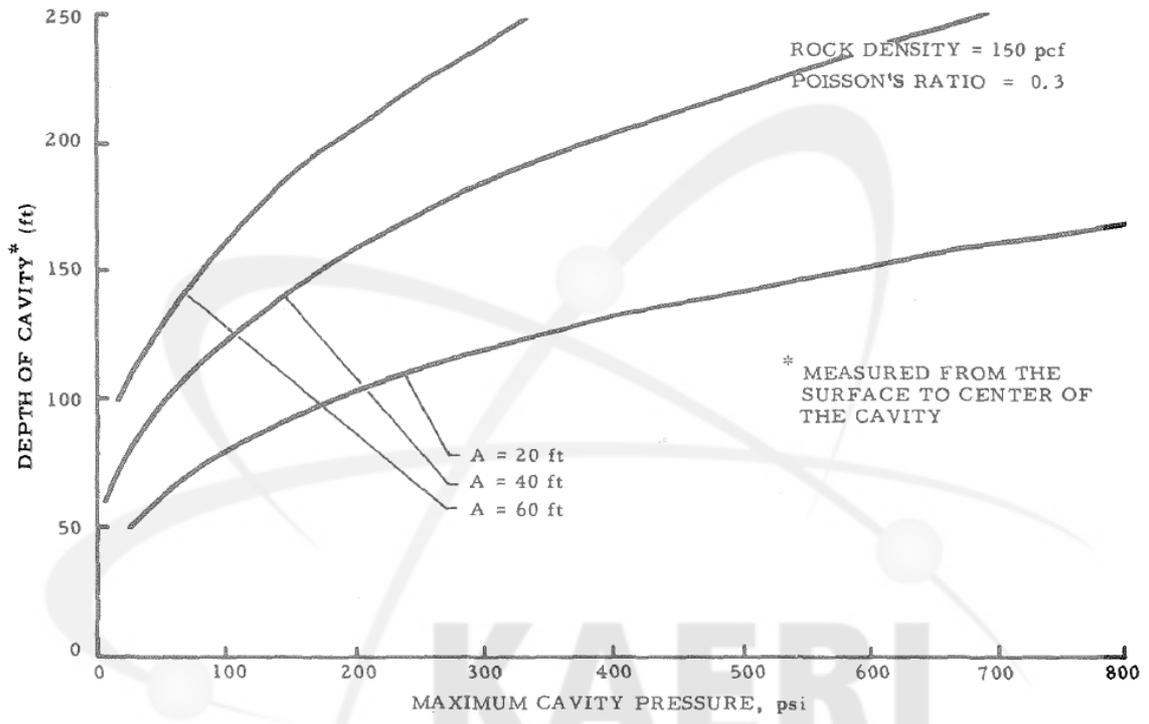


그림 4. 원통형 지하공동구의 최적 깊이

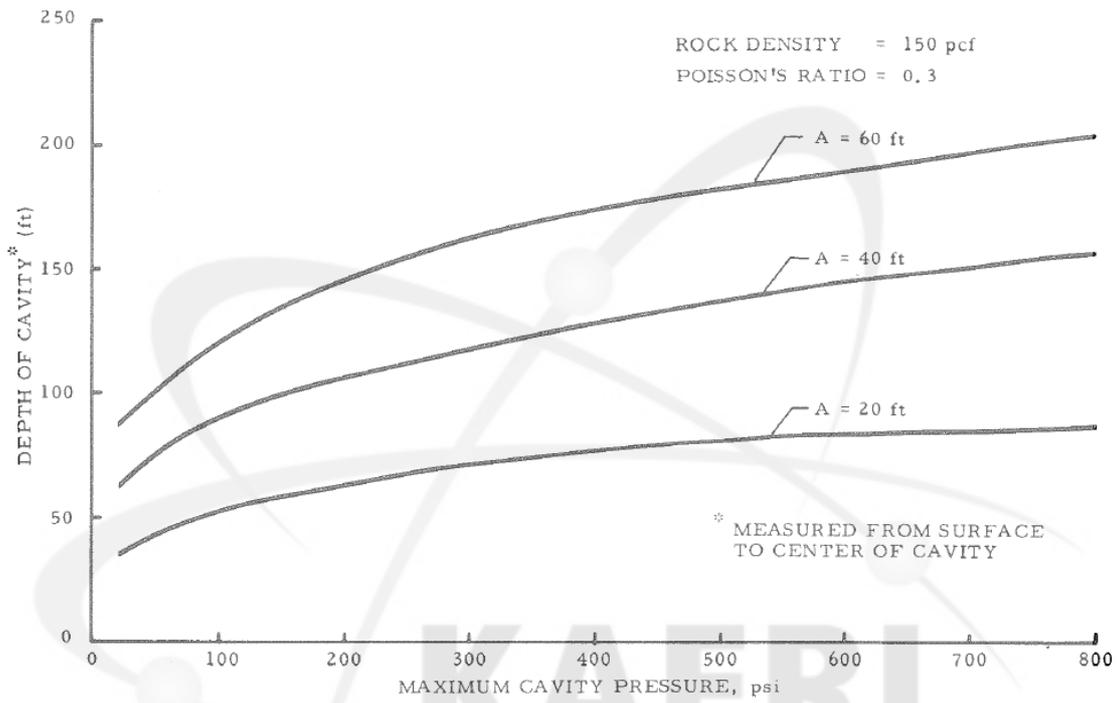


그림 5. 구형 지하공동구의 최적 깊이

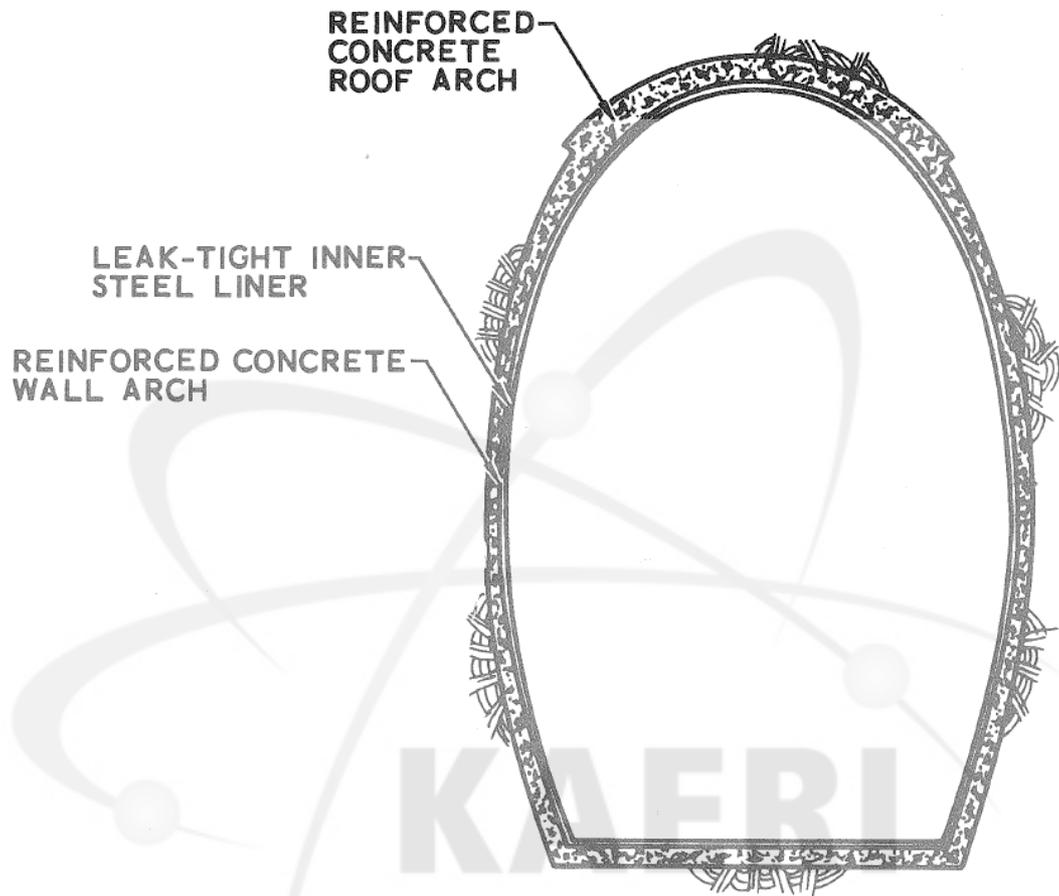
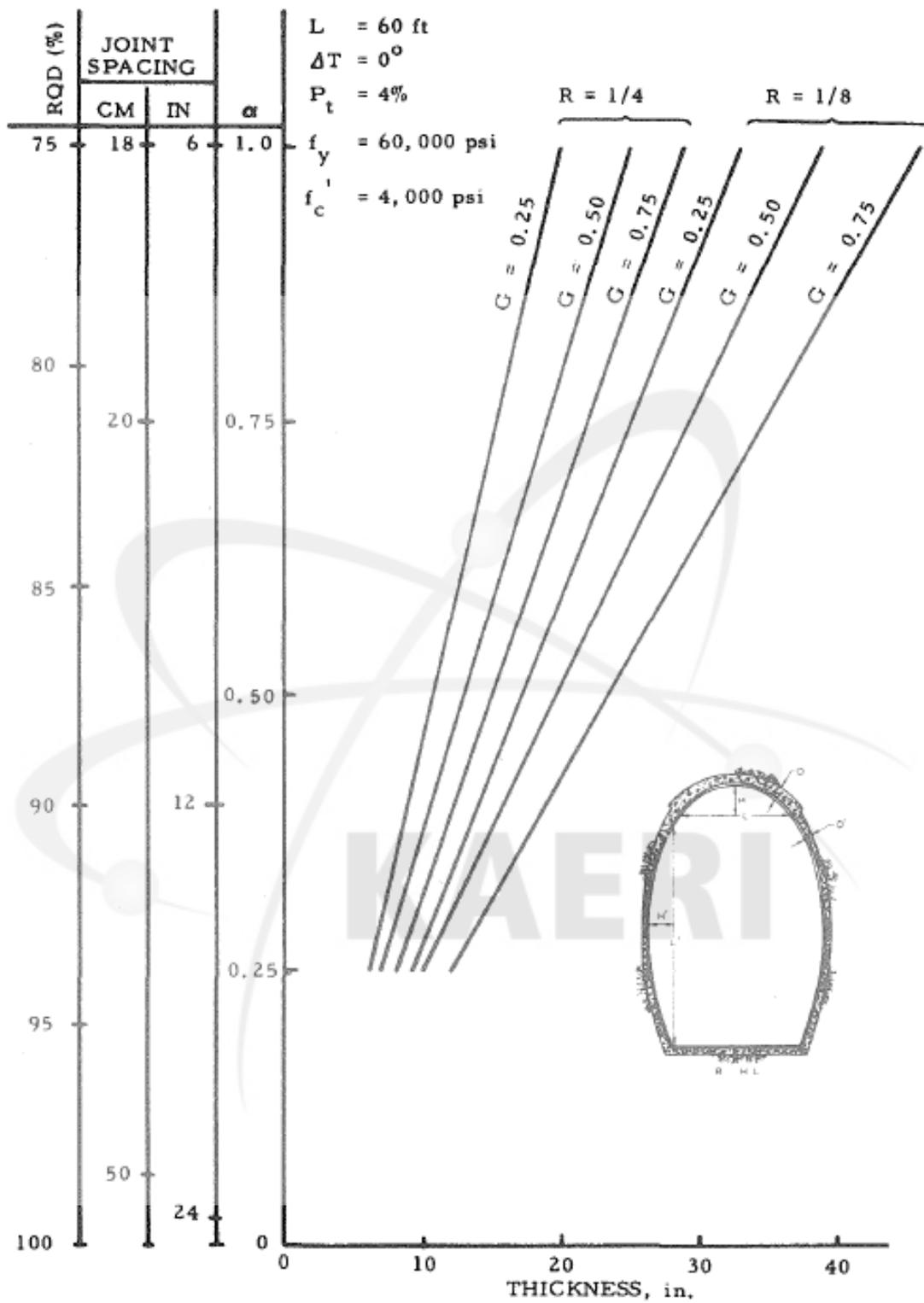
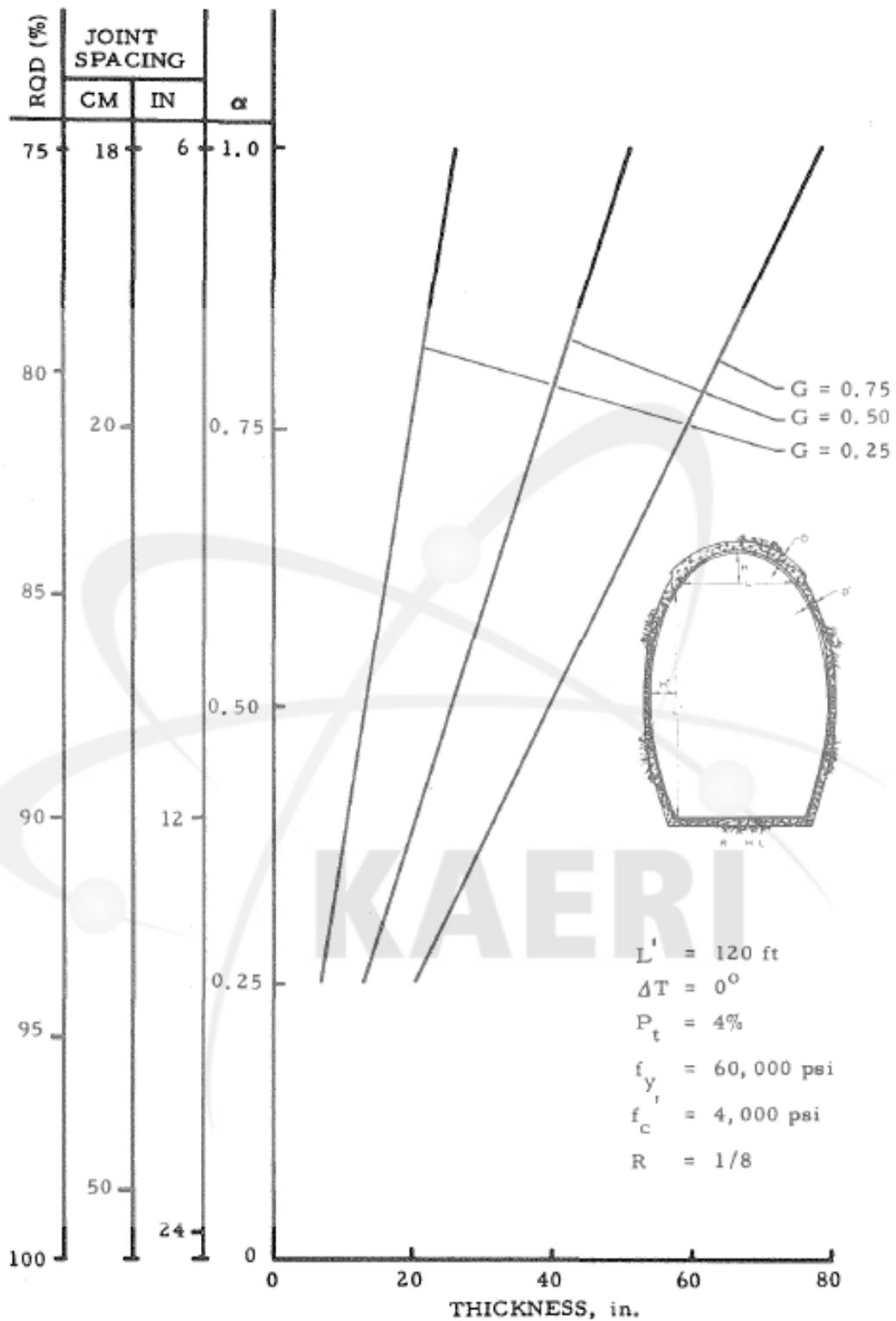


그림 6. 지하 원자력발전소의 Liner 예시



(a) 천장의 두께

그림 7. 암반의 질에 따른 Liner 두께의 변화



(b) 벽의 두께

그림 7. 암반의 질에 따른 Liner 두께의 변화 (계속)

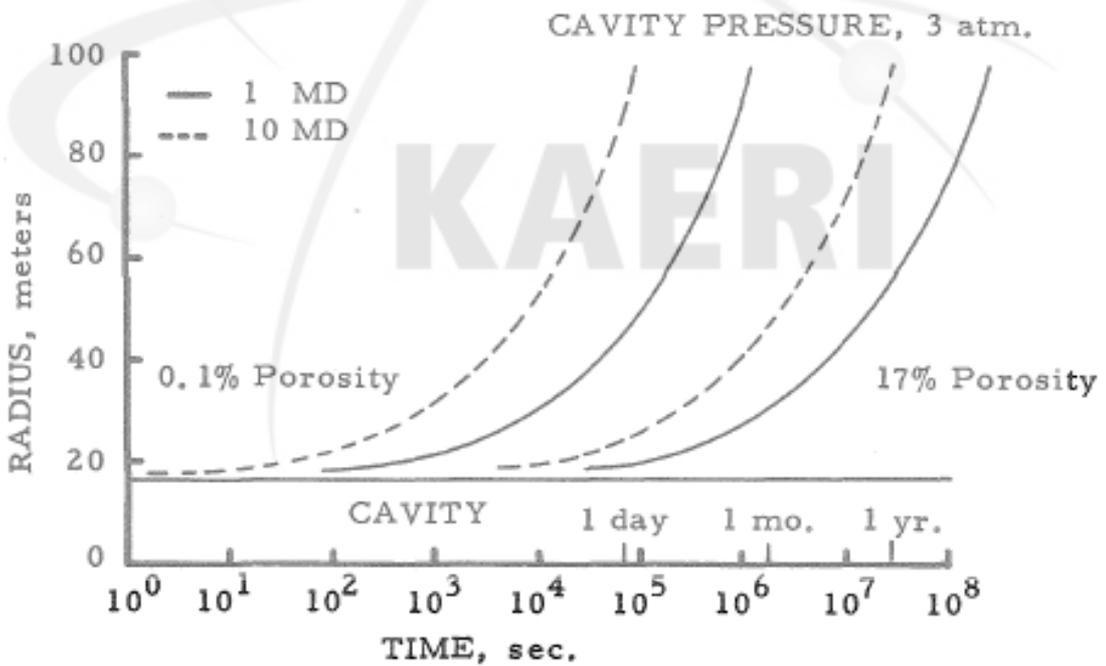
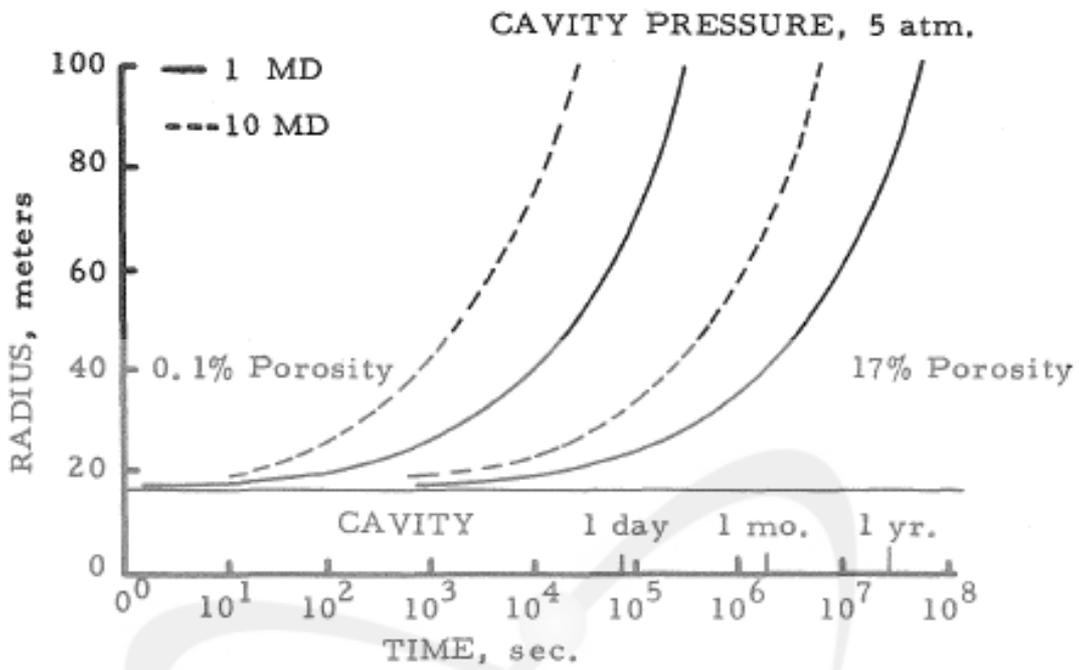


그림 8. 지반에서 기체의 침투로 인한 진행 거리

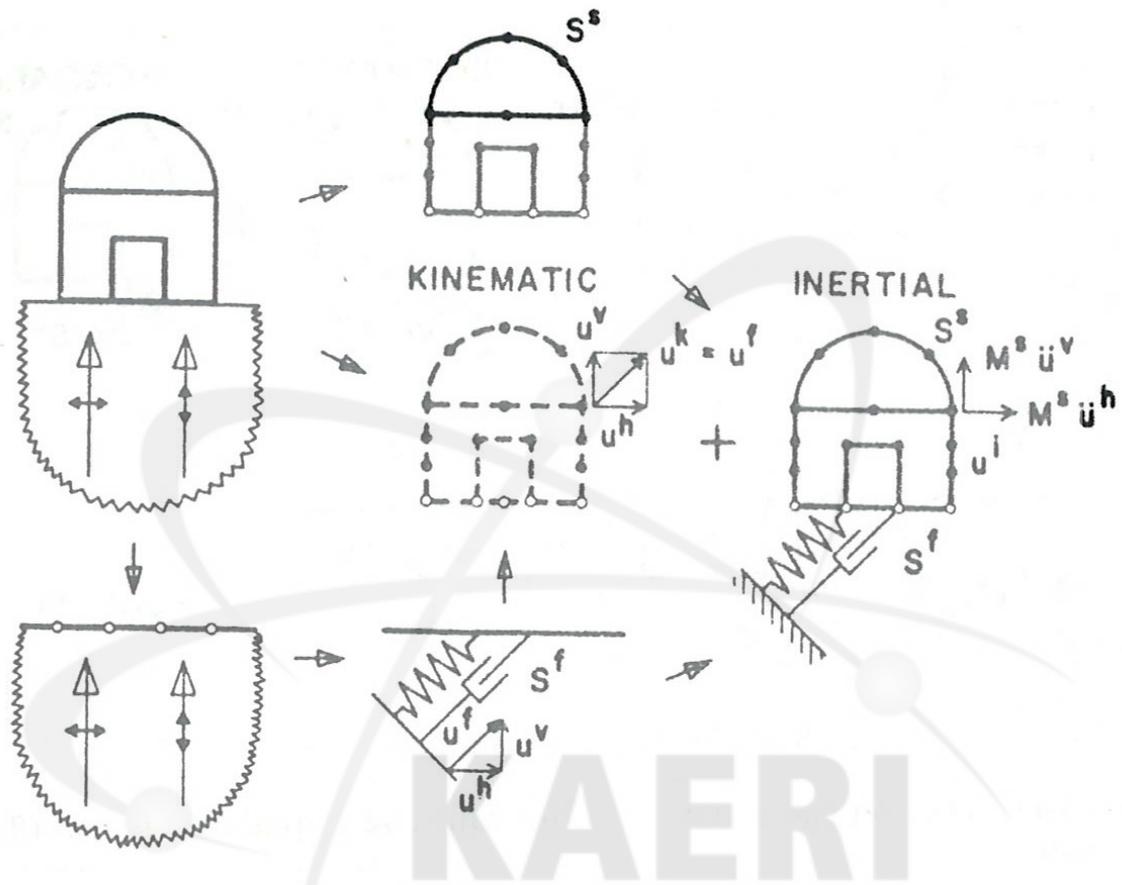
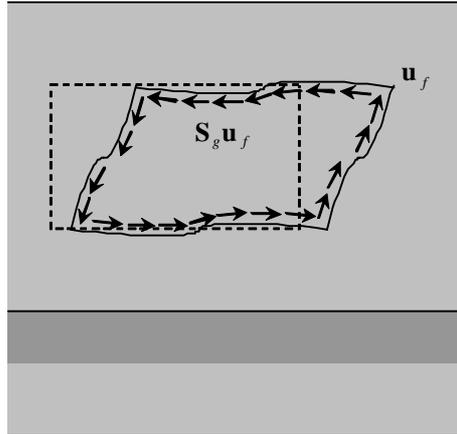
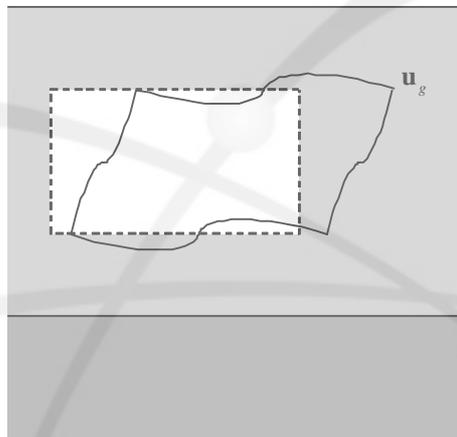


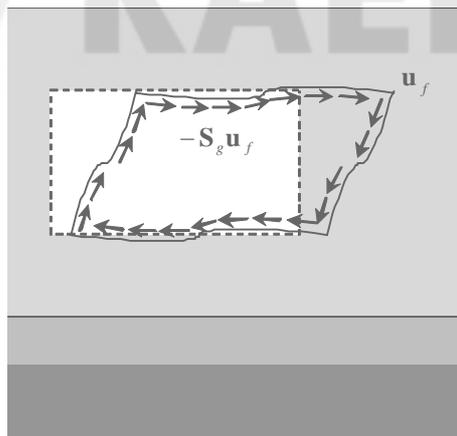
그림 9. Kinematic and inertial interaction



(a) 자유장 지반



(b) 공동지반



(c) 지중구조물 응답

그림 10. 응답변위법의 개념

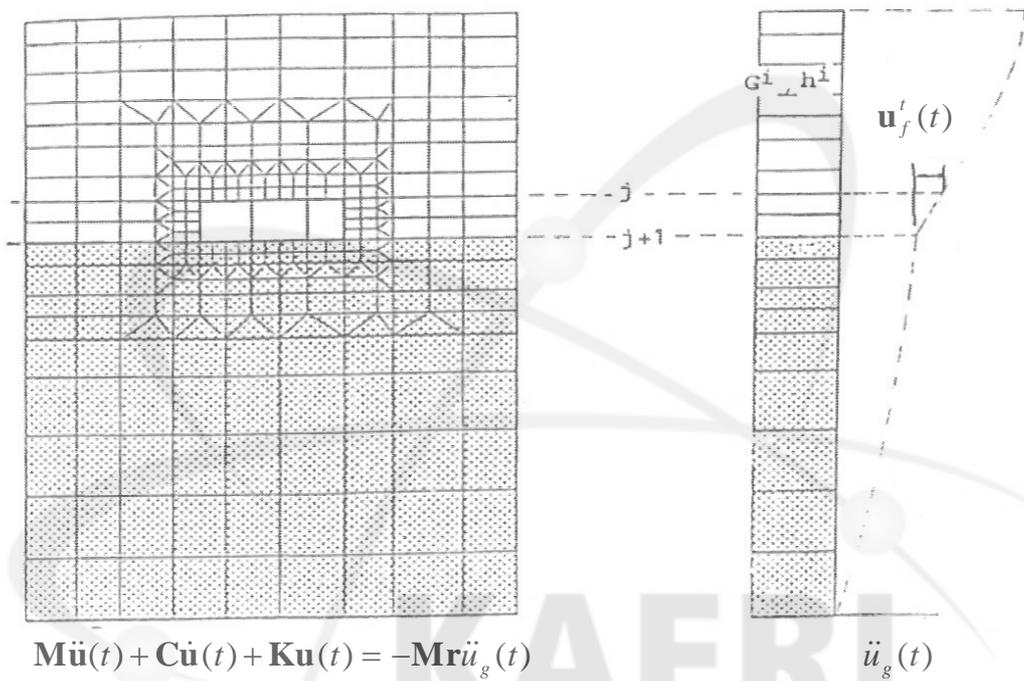


그림 11. 응답진도법의 개념

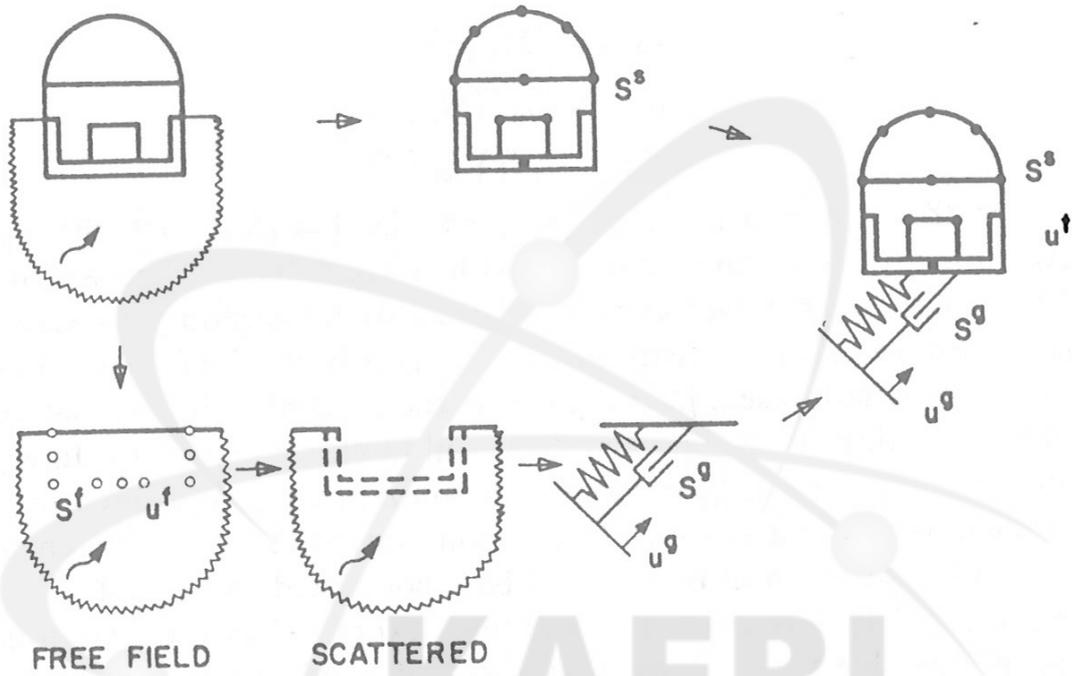


그림 12. 지반-구조물 상호작용의 물리적 의미

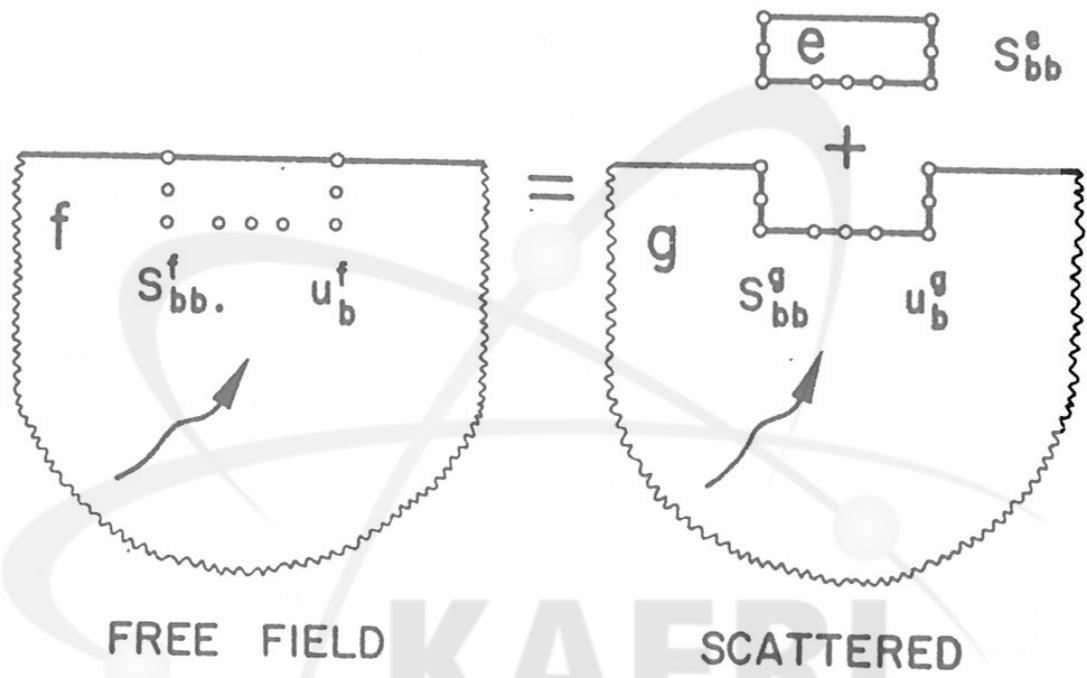


그림 13. 자유장 지반

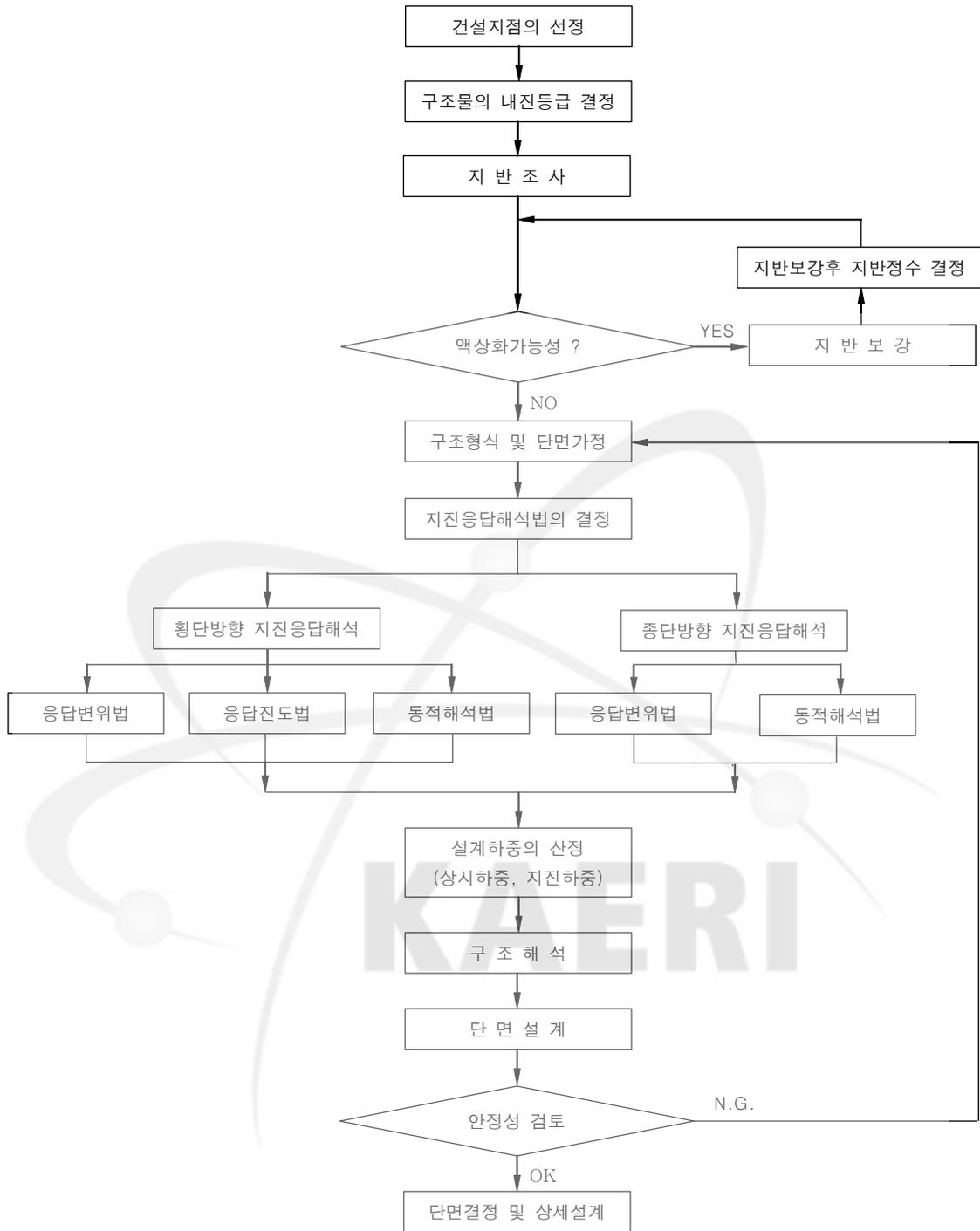


그림 14. 지하공동구의 내진설계절차

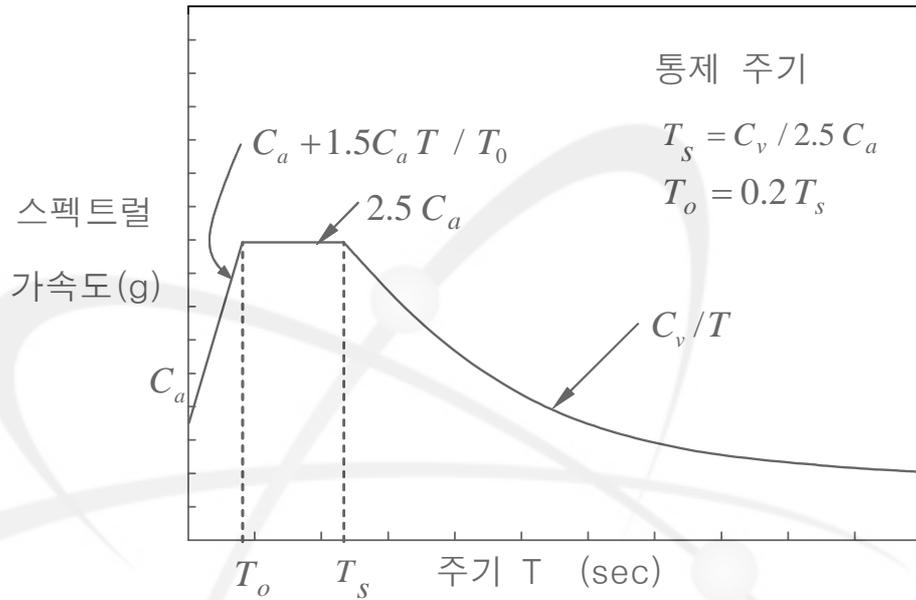


그림 15. 설계가속도응답스펙트럼의 형상 (5% 감쇠비)

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서 번호		위탁기관보고서 번호		표준보고서 번호	
KAERI/TR-3939/2009					
제목/부제		지하 원자력 시설의 장단점 분석			
연구책임자 및 부서명		이진호(연구로공학부)			
연구자 및 부서명		류정수(연구로공학부)			
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구원	발행 연도	2009. 11.
페이지	38 page	도표	있음( O ), 없음( )	크기	29.7× 21.0 (cm)
참고사항					
비밀여부	공개( O ), 대외비( ), _ 급비밀		보고서 종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약 번호		
초록 (15-20줄 내외)					
<p>최첨단의 건설기술은 거대한 지하 구조물의 실현을 가능하게 하여, 많은 새로운 구조물이 기존의 제약을 벗어나 지하에 건설되고 있다. 지하 구조물의 건설은 사용 가능한 지상 공간을 증가시킬 뿐만 아니라 지상 구조물에서는 특별히 고려해야만 했던 여러 가지 문제들을 해소하여 그 안전성과 신뢰성을 증가시킬 수 있지만, 원자력발전소의 경우는 사소한 사고가 엄청난 파국을 불러올 수 있기에 새로운 건설기술의 적용을 더욱더 신중하게 만들고 있다.</p> <p>본 연구에서는 지하 원자력 시설의 장점을 지상 원자력 시설과 비교하여 검토하였다. 또한, 지하구조물 또는 지중식 구조물의 구조해석 방법 중 응답변위법, 응답진도법, 동적해석법에 대해 정리하고 현재 우리나라에서 적용되고 있는 지하공동구 내진설계기준에 대해 요약하였다.</p> <p>지하 원자력 시설은 격납능력의 향상, 내진안전성의 향상, 경제적 이득, 용이한 폐로와 같은 장점을 분명히 가지고 있다. 그러나 이에 대한 연구는 국내에서는 이루어진 적이 없고, 국외에서도 기초적인 연구밖에 이루어지지 않았다. 한정된 공간을 가지고 있는 우리나라와 같은 경우는 지하공간 활용의 중요성이 앞으로 더욱 부각되고, 지하 원자력 시설이 실현될 수도 있을 것이다. 이러한 미래를 대비하기 위해 지하 원자력 시설에 대한 상세한 연구가 이루어져 그 기술적 토대를 확보해야 할 것이다.</p>					
주제명키워드 (10단어내외)	지하 원자력 시설, 지반-구조물 상호작용, 응답변위법, 응답진도법, 동적해석법, 내진설계				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-3939/2009					
Title/ Subtitle	Strengths and Weakness of Underground Nuclear Plants				
Project manager & Department	Jin Ho Lee (Research Reactor Engineering Division)				
Researchers & Department	Jeong-Soo Ryu (Research Reactor Engineering Division)				
Publication region	Daejeon	Publisher	KAERI	Publication date	2009. 11.
Page	38 page	Ill. & Tab.	Yes( O ), No ( )	Size	29.7× 21.0 (cm)
Note					
Classified	Open( O ), Restricted( ),		Report type	Technical report	
Sponsoring organization			Contract No.		
Abstract (15-20 Lines)	<p>High construction technologies enable huge underground structures and a number of new structures are constructed underground over the limit. Construction of underground structures increases available surface space and resolves many specially-considered problems of onground structures, which increases safety and reliability of structures. Since a slight accident of a nuclear plant can bring a catastrophe, however, application of new construction technologies is required to be careful.</p> <p>In this study, strengths and weakness of underground nuclear plants are examined and compared with those of on-ground nuclear plants. Three fundamental concepts of seismic deformation method, response acceleration method, and dynamic analysis method for seismic response analysis of underground structures are reviewed. Korean seismic design code for underground cavity is summarized.</p> <p>The underground nuclear plants have strengths such as upgrade of containment, improvement of seismic safety, economic benefits, and ease of decommission. However, a few studies have been performed about the underground nuclear plants. They are not studied in Korea. Since importance of the underground space is increasing in Korea which has limited surface space and underground nuclear plants will be constructed in the near future, strong theoretical and technical foundations has to be provided through detailed studies on the underground nuclear plants.</p>				
Subject keywords (About 10 words)	Underground nuclear plants, soil-structure interaction, seismic deformation method, response acceleration method, dynamic analysis method, seismic design				