

원자력 발전소 건물의 내진해석 모델

허 영*

1. 머릿말

원자력발전소 건물의 해석모델 결정을 위해 사용되는 이론은 일반 건물의 경우와 같으나, 사고발생시의 엄청난 결과를 예상하여 아주 낮은 확률의 사고가능성에 대하여도 고려하기 때문에 차이점을 들어낸다. 예로써, 일반건물에서는 고려하지 않는 극단하중(extreme loads)이 추가로 고려되며, 지진시 지반과 구조물의 상호작용도 반드시 검토된다.

본 글에서는 ANS(American Nuclear Society)에서 규정하고 있는 Satety Class 구조물중 격납건물의 내진해석모델에 대해 주로 언급하며, 기타 건물(Non-Nuclear Safety "NNS")은 일반건물과 차이점이 없음으로 언급하지 않는다.

U.S. NRC(Nuclear Regulatory Commision)는 참고문헌 [1]에 의해 원자력 발전소내 여러건물중 SSE(Safe Shutdown Earthquake)하중에도 견디도록 설계되어야 하는 건물들을 Category I으로 규정하여 정확한 동력학적 계산이 요구되어지나, 그 이외의 건물들은 대개 등가정적 방법에 의해 해석되어진다. 이 해석방법은 여러 빌딩규정들에서 제안된 것으로 지진에 의한 동적하중을 밀면적 단력 또는 각층에 작용하는 층전단력이라는 등가의 정적하중으로 바꿔 계산되며 이 때 사용되는 해석모델은 건물의 기본진동만을 표시할 수 있는

간단한 것이다.

2. 격납건물

격납건물(containment building)은 위에서 언급한 Category I에 속하는 대표적인 건물로 극단하중(SSE하중, Tornado하중, Tsunamis 하중등)을 고려하여 해석된다. 이에 따라 설계를 위해 사용하는 하중조합도 달라져 훨씬 많은 수의 하중조합이 고려된다[2],

여러 극단하중들 중 SSE하중이란 원자력발전소 건설지역에서 기대될 수 있는 최강의 지진으로 Federal Code to CFR은 Category I에 속하는 건물들에 대해 SSE하에서도 가동가능한 상태로 견딜수 있도록 규정하고 있다. 이를 위한 내진해석은 크게 두 단계로 나뉘어져; 첫째, 토목구조물 자체의 내진해석과, 둘째, 내부의 부속구조물 또는 부속기기의 해석으로 나뉘어진다.

내진해석을 위해 사용되는 설계지진은 자유장(free field)-에서 직교하는 세개의 방향으로 작용하는 것으로 참고문헌 [3]에서 정의하고 있는 특수지역에 한정되지 않는 광폭스펙트라(broad-band spectra) 또는 특수지정된 지역에 국한되는 협폭스펙트라(narrow-banded site-specific response spectra)를 사용한다.

격납건물의 경우 전에는 증기발생장치(NSSS: Nuclear Steam Supply System)의 형태에 따라

* 정회원; 서남대학교 토목공학과 조교수

외부모양이 달랐으나 요즈음은 거의 동일한 모양의 셸구조를 하고 있다. 격납건물을 포함한 Category I 건물들의 내진해석을 위한 계산모델 결정시 반드시 검토되어야 하는 사항은 다음과 같다.

1) Category I 구조물의 동적응답에 영향을 미치는 주위 구조물은 내진해석모델 결정시 모두 고려되어야 한다.

2) 지진과 구조물의 상호작용은 반드시 검토되어야 하며, 구조물이 암반 또는 이와 유사한 지반위에 건설하지 않는 경우, 그 영향이 모델결정시 고려되어야 한다.

3) 강성중심과 질량중심의 불일치를 위한 회전 이 모델에 의해 고려되어야 한다.

4) 수평방향응답과 수직방향응답이 서로 영향을 미칠때는 이 두가지가 하나의 모델에서 고려되어야 한다.

격납건물의 계산모델도 일반건물의 경우와 같이 집중질량모델과 유한요소모델로 대별되어지며, 후자의 경우 집중질량모델 결과의 검증이나 동적 특성이 특히 복잡한 경우에 주로 사용된다.

행렬식으로 나타내어 지는 모델의 운동방정식중 질량행렬은 consistent 질량모델과 lumped 질량모델 둘로 구분되나 결과에서는 두가지 경우가 유사한 결과를 나타낸다.

집중질량모델의 사용시 집중질량의 위치나 갯수는 구조물의 종류에 따라 다르나 일반적으로 요구되는 모드변화의 두배로 한다. <그림 1>은 냉각재 및 최고 감속재로 경수가 사용되는 가압식경수로(PWR: Pressurized Water Reactor) 격납건물의 집중질량 모델로 외부구조는 11개, 내부구조는 7개의 집중질량으로 되어있다.

집중질량 결정시 중요사항은: 첫째, 전체질량은 반드시 실제와 같아야 하며, 둘째, 부분구조와 전체시스템의 중점(center of gravity) 및 회전현상이 충분히 모델에 반영되어야 한다. 운동방정식중 감쇠행렬을 만들기 위한 구조물의 감쇠성능의 파악은 경우에 따라 실험에 의해 어느정도 정확한 값이 구해질수 있으나 계산모델에 정확하게 표현하는 것은 현재로서는 불가능하다. 예로서 지진이 갖는 특성중 지진마다 다른 주파수성분들의 이유

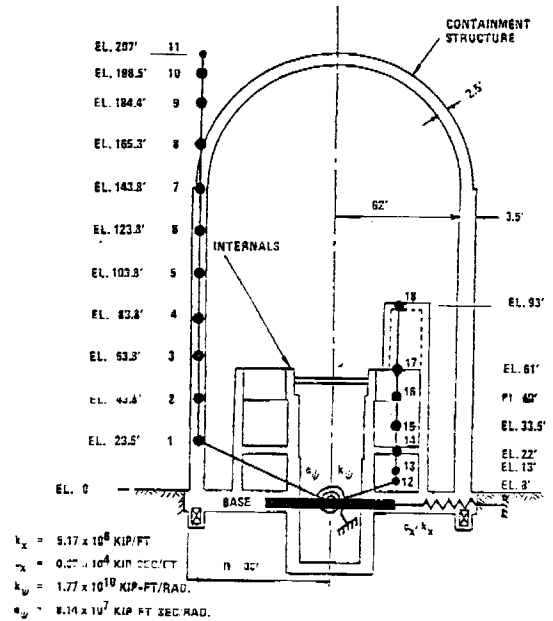


그림 1. PWR 격납건물의 집중질량모델

로 인해 모델에 의한 구조원의 감쇠성능 고려는 쉬운 문제가 아닌 것이다.

현재 국내의 원자력발전소 격납건물은 암반위에 세워져 고정단 가정에 의해 물질감쇠(material damping)만을 고려하나, 암반위에 서있지 않는 경우는 기하학적 감쇠(geometrical damping)도 고려하여야 함으로 더욱 복잡하여진다.

<표 1>은 참고문헌 [4]에서 조사된 원자력발전소 건물들의 감쇠행렬 결정을 위해 사용되는 감쇠값들이다.

구조물의 감쇠기능은 참고문헌 [4]에서 정의한 바와 같이 구조물의 종류에 따라 다르며, 지반의 경우 측정이나 실험에 의해 결정되는 지반의 변형률에 맞는 값을 택한다.

3. 지반과 구조물의 상호작용

구조물이 강체로 볼수 없는 지반위에 서 있는 경우 서로의 상호작용이 고려되어야 하며 이를 위해 집중질량이나 유한요소에 의해 모델화된 구조물의 계산모델은 지반의 계산모델과 연결되어진다.

표 1. Recommended damping values

| Stress Level | Type and Condition of Structure | Percentage of Critical Damping |
|--|--|--------------------------------|
| Working stress, no more than about 1/2 yield point | a. vital piping | 0.5 to 1.0 |
| | b. Welded steel, Prestressed concrete, well reinforced concrete (only slight cracking) | 2 |
| | c. Reinforced concrete with considerable cracking | 3 to 5 |
| | d. Bolted and/or riveted steel, wood structures with nailed or bolted joints | 5 to 7 |
| At or just below yield point | a. vital piping | 2 |
| | b. Welded steel, prestressed concrete (without complete loss in prestress) | 5 |
| | c. Prestressed concrete with no prestress left | 7 to 10 |
| | d. Reinforced concrete | 7 |
| | e. Bolted and/or riveted steel, wood structures, with bolted joints | 10 to 15 |
| | f. Wood structures with nailed joints | 15 to 20 |

지반모델은 유한요소로 만들어 지거나 임피던스(impedance)에 의해 표현되며, 임피던스란 기초의 형상, 깊이, 강성과 함께 지반의, 동적 특성 및 작용하는 지진중의 주파수들은 고려하여 만들어지는 것으로 지반과 구조물 기초사이의 파의 분산을 나타내는 값이다. 지반의 임피던스모델은 스프링과 댐퍼(damper)로 만들어져 각기 지반의 강성과 감쇠기능을 대표한다.

물린 기초의 경우 물린 깊이가 지반의 임피던스에 무시할 수 없는 영향을 미치며 특히 수평성분과 회전성분의 상관값들은 이것에 직접적인 영향을

받는다. 이에 반해 감쇠행렬의 경우는 두 성분의 상관값에 덜 영향을 받아 이 상관값을 무시하여 계산되기도 한다.

기초상부의 구조물(super structure)이 집중질량 모델로 표현되어 보요소에 의해 모델화된 벽체의 경우 상대적으로 큰 기초의 강성에 의해 실제보다 큰 강성을 나타낼 수 있으므로 이를 위해 기초와 상부구조물이 연결되는 부위에는 임의의 큰 강성을 갖는 보요소를 사용하거나 기초의 강성을 키워서 해석한다.

4. 맺는말

원자력발전소내의 여러건물 중 격납건물은 특히 높은 안정성이 요구되고 구조물 자체의 계산결과는 그 결과 내부 부속구조물 및 설치기기의 설계에도 사용됨으로 구조물의 계산모델은 특히 중요하다. 현재 국내의 기술 수준은 원자력발전소내 토목구조물의 지진해석은 어느정도 수준에 도달해 있으나 내부부속 구조물이나 기기와 연결에 의한 거동파악에는 더 많은 기술특성이 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] U.S. NRC Regulatory Guide 1.29.
- [2] Code for Concrete Reactor Vessels and Containments, ASME Section III, Division 2.
- [3] U.S. NRC Regulatory Guide 1.60
- [4] N.M. Newmark and W.J.Hall
Procedures and Criteria for Earthquake Resistant Design.
Building Practices for disaster mitigation, U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, 1973.