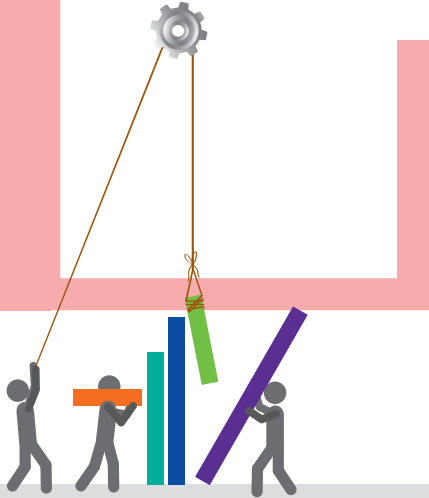


기기 장착조건에 따른 내진검증방법 및 적용기술기준

Seismic Qualification methods and Applicable Standards considering Mounting condition of Equipment



SCIENTIFIC ARTICLE

1. 머리말

원자력발전소는 지질, 지반상태, 지진발생이력 등을 조사하여 분석된 최대지진에 견딜 수 있도록 내진설계가 되었고, 발전소 구조물과 기기는 내진 건전성이 항상 유지되도록 관리되고 있다. 본고에서는 발전소 구조물에 설치되는 기기의 내진검증방법과 내진검증에 대하여 다음과 같이 소개하고자 한다. 기기의 내진환경은 장착조건에 따라 상이하므로 적용되는 내진검증방법 또한 실제 기기의 사용 환경을 고려하여 결정하여야 하며 기기의 장착조건은 크게 바닥 장착기기(Floor-mounted equipment)와 배관 장착기기(Line-mounted equipment)로 구분할 수 있다.

2. 내진검증방법의 분류

원자력발전소의 기기 내진검증은 5회의 운전기준지진(OBE; Operating Basis Earthquake)과 1회의 안전정지지진(SSE; Safe Shutdown Earthquake)으로부터 발생한 힘이 가해지는 동안 및 그 이후의 조건에서 기기가 원래의 안전기능을 충분히 수행할 수 있도록 설계되었는지를 입증하고, 보증하는 과정으로서 지진부하에 대한 구조적 건전성(Structural Integrity)과 운전성(Operability)의 검증을 의미한다.

내진검증방법으로는 해석, 시험, 해석과 시험의 병행, 경험에 의한 방법이 있다. 해석은 Fig.1과 같이 기기의 수학적 모델에 대한 해석을 수행하여 검증하는 방법으로서 구조건전성이 주요 관심사항인 펌프, 탱크와 같은 기계 기기의 경우에 적용한다. 해석의 방법으로는 동적해석(Dynamic analysis)과 정적계수해석(Static coefficient analysis)이 있으며 지진조건 하에서 어떤 방법이 기기의 성능을 가장 정확하게 나타낼 수 있는지를 검토하여 결



박 헌 Park, Hun

한국수력원자력(주) 기술본부
설비개선실 구조내진팀, 대리
honeypark@khnp.co.kr



정 동 열 Jung, Dong-yeoul

한국수력원자력(주) 기술본부
설비개선실 구조내진팀, 차장
dongyeoul@khnp.co.kr



방 창 준 Bang, Chang-joon

한국수력원자력(주) 기술본부
설비개선실 구조내진팀, 부장
bang.changjoon@khnp.co.kr

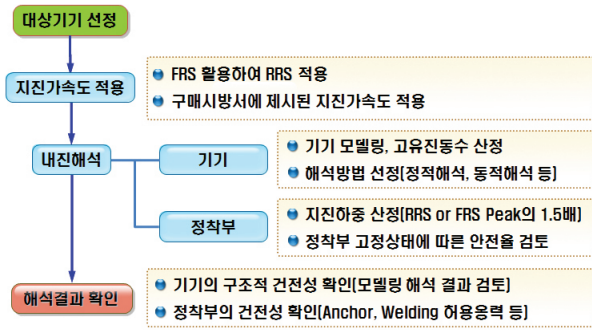


Fig. 1 해석에 의한 내진검증 흐름도

구분	장점	단점
해석	<ul style="list-style-type: none"> • 취약부위 파악 및 안전 여유도 계산 가능 • 3축 지진입력을 동시 고려 가능 • 설계변경이 용이 	<ul style="list-style-type: none"> • 해석과정에 많은 가정 사항을 포함함 • 비선형효과 고려 시 비경제적 • 운전성(기능성) 입증 어려움
시험	<ul style="list-style-type: none"> • 가정사항 적음 • 비선형효과 고려됨 • 불확실성 및 오류 최소화 • 운전성(기능성) 입증 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 극한시험을 제외하고 안전여유도를 알 수 없음 • 다른 연계효과(온도)의 고려가 어려움 • 기기의 크기에 제한을 받음

Table. 1 검증방법 특징 비교

정한다. 동적해석은 1차 고유진동수가 관심주파수의 상한값(Cut-off frequency 주로 33Hz)보다 작은 비강체 flexible 기기에 적용하며, 해당 기기가 위치하는 층응답 스펙트럼FRS; Floor Response Spectrum에 상응하는 지진시각이력을 도출하고 도출된 시간이력을 해당 기기의 해석모델에 입력값으로 사용하여 기기의 응답 및 응력을 구하는 방법으로 수행이 복잡하며 시간이 많이 소요된다. 정적계수해석은 고유진동수가 관심주파수 상한값보다 큰 강체rigid 기거나 보, 기둥 등과 같은 간단한 구조에 적용하며 주파수별 기기의 증폭효과를 고려하기 위해 정적계수 1.5를 적용하는 방법으로 보수적이지만 단순한 해석방법이다.

시험은 기기를 진동대 위에 설치하여 실제 진동시험을 실시하여 검증하는 방법으로 구조적 건전성과 운전성을 모두 확인해야 하는 전기, 계측기기의 경우에 적용한다. 기기가 장착되는 위치에 따라 기기가 받는 실제 지진조건을 모의하기 위해 바닥 장착기기는 복수진동수시험으로 배관 장착기기는 단일진동수시험의 방법을 적용하여 검증한다.

기기의 형상이 크고 복잡하거나 특정한 시험결과를 유사한 기기에 확대 적용하는 경우 해석과 시험을 병행하여 검증을 수행한다. 이는 다중캐비닛 집합체처럼 시험설비 규모의 한계로 시험 불가능한 기기에 대해 시험용 모델의 시험 시 받는 지진입력조건이 실제 주어진 검증요건과 동등하거나 보수적임을 입증하는 해석을 병행하여 검증하는 방법이다. 해석과 시험을 통한 검증 방법의 특징은 Table 1과 같다.

경험에 의한 방법은 기 검증된 기기와 기능 및 물리적 특성이 유사한 기기나 실제 지진을 경험한 기기와 유사한 기기의 검증 시 기존 기기의 경험자료를 이용하는 검증방법이다. 경험자료는 많은 경우의 수를 갖는 문서화 또는 수치화된 자료이어야 하고, 이를 이용하는 경우 사용할 경험자료와 검증할 기기의 유사성을 기술적으로 신중히 검토해야 한다.

3. 기기의 장착조건별 검증방법

3.1 바닥 장착기기 내진검증

펌프, 탱크, 열교환기와 같은 기계기기와 인버터, 변압기와 같은 전기·계측기기가 바닥에 장착되어 있는 기기는 2.항의 내진검증방법에 따라 기기와 정착부에 대한 구조 건전성과 운전성의 검증을 수행한다. 전기·계측기기의 내진시험은 IEEE 344에 따라 복수진동수 RMF; Random Multi-Frequency 시험을 수행하며, 이는 지진 지반운동이 대략 33Hz까지 복수 진동에너지 분포를 나타내고 있어 실제 지진환경을 모의하기 위함이다. 내진시험 시 기기의 개별 허용기준은 Table 2의 기술기준에서 정하고 있다.

시험절차는 설계 및 검증 요건으로 제시되는 FRS에 10%의 여유도를 가지고 작성한 요구응답스펙트럼RRS; Required Response Spectrum을 입력지진으로 하여 OBE 5회, SSE 1회 RMF 시험을 수행한다. 시험될 기기는 실제 사용을 위해 권장되는 것과 동일한 방법으로 진동대 위에

분류	적용기술기준
모터제어반	IEEE 649
축전기, 인버터	IEEE 535, IEEE 650
스위치기어	IEEE C37.81
계전기	IEEE C39.98

Table. 2 전기·계측기기 종류별 내진검증기술기준

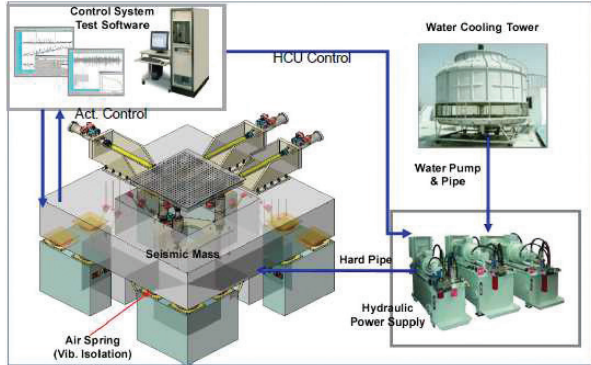


Fig. 2 3축 내진 시험장비 구성도

장착되어야 한다. 내진시험장비는 3차원적 지진환경의 모의요건을 만족한다는 것을 입증해야 하므로 Fig. 2와 같이 3축 시험장비를 사용하는 것을 IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers에서는 권장하고 있으며, 현재 국내 성능검증기관은 대부분 3축 시험장비를 사용하여 내진검증을 수행하고 있다.

3.2 배관 장착기기 내진검증

배관장착기기는 밸브 본체, 밸브 작동기 및 기능적 부속품으로 구성된다. 일반적으로 밸브본체는 구조가 단순하여 기기의 구조적 강도만 유지되면 기기의 성능이 유지되므로 내진해석에 의한 검증을 한다. 밸브작동기와 제어부품은 전기 및 계측기기로 기능적 성능을 해석의 방법으로 입증하기 어려워 모의지진 조건 하에서 내진시험을 수행한다. 밸브의 설계 및 검증에 요구되는 적용기술기준은 Table 3과 같다.

분류	적용기술기준
밸브 본체 (Valve Body)	IEEE 344 ASME Sec. III
밸브 작동기 및 기능적 부속품 (Valve Actuator and Accessory)	IEEE 344, IEEE 382 ASME Sec. III,

Table. 3 밸브 설계 및 검증 적용기술기준

압력경계부분을 포함한 밸브 본체는 IEEE 344에 따른 내진해석을 수행한다. 배관장착기기의 설계 요건은 고유진동수를 33Hz 이상이 되도록 요건을 부여한다. 이는 지진이 1Hz~33Hz 진동수 영역에서 잠재적 손상을 발생시키고 33Hz 이상에서 에너지가 거의 없으므로 배관장착기기 설계 및 제작 시 33Hz 이상의 고유진동수를 갖도록 하여 지진환경 하에서 지진입력에 대한 증폭현상이 일어나지 않도록 하기 위함이다. 배관계 Piping system 설계 시 배관계에 장착되는 기기를 강체로 간주하며, 지진부하 하에서의 배관계 응답을 해석하여 배관장착기기 무게중심에서의 최대 응답을 배관장착기기의 최소 내진검증 요건으로 고려한다. 밸브 본체의 내진해석은 모드해석 Modal analysis을 수행하여 설계요건인 고유진동수가 33Hz 이상임을 입증한 후 응력해석 Stress analysis을 수행하여 사용조건 별 적용부하에 대한 요소 중 응력을 집중적으로 받는 취약요소 Body Run, Body Neck, Bonnet, Disc, Mounting Flange & Bolting 각각에 대하여 발생응력과 허용응력을 비교하여 강체요건과 구조적 강도 요건을 만족시킴을 입증한다. 일반적으로는 Table 4에서 가장 큰 사용조건 D의 조합된 부하를 적용하여 해석한 후 발생응력을 사용조건 A의 허용응력기준 Service Limit A 보다 적음을 입증하여 모든 사용조건의 요건을 보수적으로 만족함을 입증한다.

밸브 작동기 및 기능적 부속품은 운전성 검증을 위해 IEEE 344와 IEEE 382에 따른 내진시험을 수행한다. 장착조건이 Line-mounted인 기기는 IEEE 382에 따라 가진 Excitation 환경을 가장 잘 모의하는 RIM Required Input Motion 내진시험을 수행한다. 내진시험 시 시험용 작동기는 Fig. 4와 같이 진동대 위에 실제 장착과 최대한 근접하게 모사하여야 하며 전기부하, 수력학적 부하 등을 포함시킨다. OBE 시험은 Fig. 5 RIM Curve의 2/3 수준인 두 개의 정현파형 Sinusoidal sweep으로 세 축에 대해 각각 분당 1 옥타브를 초과하지 않는 비율로 2Hz에서 35Hz로, 그리고 다시 2Hz의 단일 진동수 정현스위프 Sine-sweep 시험을 수행한다. SSE 시험은 Fig. 5 RIM Curve의 형태로 1/3 옥타브 간격으로 일련의 단일 진

사용조건	부하조합	허용응력기준 (ASME Sec. III)
Level A (Normal)	자중 + 압력	Service Limit A
Level B (Upset)	자중 + 압력 + OBE + Hydrodynamic Loads	Service Limit B
Level D (Faulted)	자중 + 압력 + SSE + Hydrodynamic Loads + Pipe Break Loads	Service Limit B (Active) Service Limit D (passive)

Table 4 사용조건별 부하조합 및 허용응력기준



Fig. 4 RIM 내진시험 전경

동수 정현비트 Sine-beat 시험을 수행하며 반드시 운전성을 검증한다.

장착조건이 Floor-mounted를 고려하는 경우에는 앞서 기술한 OBE, SSE RIM 시험 완료 이후 SSE RMF 시험을 수행하여 배관장착과 바닥장착의 조건을 모두 입증한다.

4. 맺음말

원자력발전소는 지진으로 피해가 발생할 경우 방사성물질이 외부에 누출되는 최악의 상황을 가정해야하기 때문에 어떤 설비보다도 지진에 대한 철저한 대비

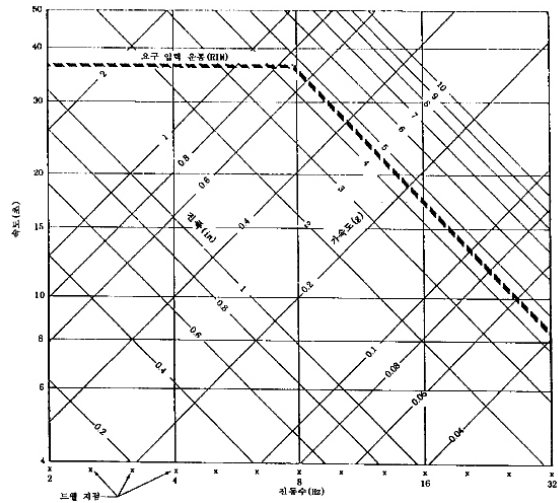


Fig. 5 내진검증 요구입력운동(RIM)

책이 요구된다. 따라서 기기 및 기기 정착부의 내진검증은 발전소 설계 안전성이 품목 교체 또는 설계변경 후에도 보장된다는 것은 매우 중요하므로 기기의 장착 위치와 특성을 고려하여 내진검증이 수행되어야 한다. 또한 일반적 내진검증 기술기준인 IEEE 344는 물론 각 기기의 종류에 따른 개별 기술기준도 함께 고려되어야 한다. ❖

● 참고문헌 references ●

- 1 IEEE 323, "IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations", 2003 edition
- 2 IEEE 344, "IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations", 2004 edition
- 3 IEEE 382, "IEEE Standard for Qualification of Safety-Related Actuators for Nuclear Power Generating Stations", 2006 edition
- 4 ASME Sec. III, Division 1, Subsection NB/NC/ND, "Class 1/2/3 Components", 2010 edition