

원자로 진동평가 및 지진응답조합 규제기술요건

Regulatory Requirements for Reactor Vibration Assessment and Seismic Response Combination

김용범† · 박찬일* · 정해동*

Yong Beum Kim, Chan Il Park, Hae Dong Chung

1. 서 론

원자력발전소의 주요 구조물, 계통 및 기기들은 가동 시 원자로 냉각재의 열수력 하중에 의해 미세한 진폭으로 진동하게 된다. 따라서 원자로 시설은 안전기능의 중요도에 상응하는 품질기준에 따라서 설계, 재료선정, 제작, 건설, 설치, 시험 및 검사되어야 한다. 또한 안전정지진 및 운전기준지진의 발생 시에도 원자로 시설의 기능 유지를 보장하기 위하여 적절한 동적 내진해석이 수행되어야 한다.

이를 위해 미국원자력규제위원회(USNRC)에서는 규제지침 1.20⁽¹⁾을 제정하여 원자력발전소의 구성기기 중 원자로 내부구조물(RVI)에 대한 진동해석, 진동측정, 검사프로그램에 대한 기준을 제시하였다. 또한 규제지침 1.92⁽²⁾를 제정하여 원자력발전소의 내진설계에 필요한 최대지진응답을 예측하기 위한 적절한 조합방법을 제시하였다.

본 논문에서는 유체유발진동에 대한 원자로 내부구조물의 구조적 건전성을 입증하는데 사용되는 종합적인 진동평가계획(CVAP, Comprehensive Vibration Assessment Program)에 관한 기준을 소개하였으며, 동적 내진해석 시 요구되는 지진응답의 조합방법에 대해 기술하였다.

2. 원자로 내부구조물의 종합진동평가

2.1 원자로 내부구조물의 분류

원자로 내부구조물은 설계, 운전변수 그리고 운전

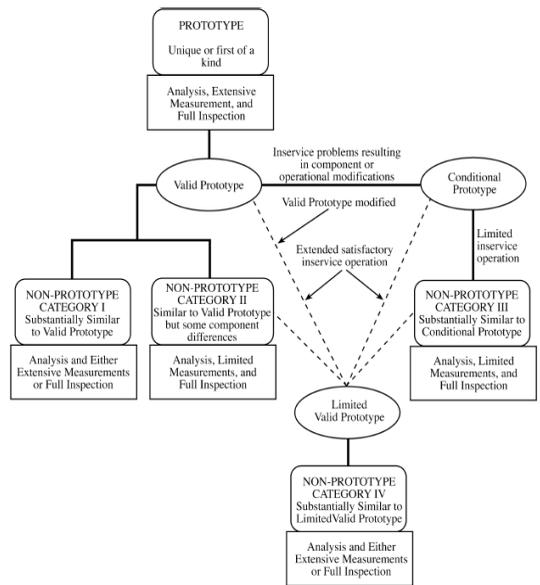
† 교신저자; 정회원, 한국원자력안전기술원
E-mail : ybkim@kins.re.kr

Tel : 042-868-0165, Fax : 042-868-0035

* 한국원자력안전기술원

경험에 따라 분류되며, 종합진동평가계획은 각 분류에 따라 명시된 지침을 근거로 수립된다.

원자로 내부구조물은 원형(Prototype), 유효원형(Valid prototype), 조건부원형(Conditional prototype), 비원형 범주 I(Non-prototype, category I), 비원형 범주 II(Non-prototype, category II), 제한적 유효원형(Limited valid prototype), 비원형 범주 III(Non-prototype, category III), 비원형 범주 IV(Non-prototype, category IV)로 분류된다. 각각의 정의는 참고문헌 (1)에 기술되어 있으며 간략한 분류체계 및 종합진동평가계획의 요약도는 그림 1과 같다.



□ Reactor internals configuration for which comprehensive vibration assessment program is defined.
□ Summary of comprehensive vibration assessment programs.
○ Reactor internals reference design which, together with its test and operating experience, provides the basis for a specific comprehensive vibration assessment program.
---- Indicates alternative paths.

Fig. 1 Summary of RVI CVAP

22 종합진동평가계획

원자로 내부구조물의 종합진동평가계획은 2.1절에서 제시된 각 분류에 따라 수립되며, 가동전 및 초기 시운전, 시험과 관련하여 수행된다. 종합진동평가계획은 진동 및 응력 해석계획, 진동 및 응력 측정계획, 검사계획으로 구성된다. 진동 및 응력 해석계획에는 정상상태 및 예상 과도운전 조건에서의 진동 및 응력 해석 수행과 관련하여 해석모델, 축소법칙, 축소모델, 고유진동수, 고유모드형상, 랜덤 및 확정적 하중함수, 구조적/수력학적 응답 등에 관한 사항이 포함되어야 한다. 진동 및 응력 측정계획은 원자로 내부구조물의 구조적 건전성을 입증하고 안전여유도를 결정하기 위해 수립되어야 하며, 기동 및 출력상승 프로그램, 데이터 취득 및 분석 시스템, 시험운전조건 등이 포함되어야 한다. 검사계획은 운전시작 이전과 운전 이후의 원자로 내부구조물 검사를 위해 준비되어야 하며, 주요 검사부위, 특정 검사부위, 검사절차 등이 포함되어야 한다.

3. 지진응답해석시 모드응답과 각 방향성분의 조합

3.1 모드응답의 조합

원자력발전소 내진설계에 필요한 최대응답은 응답스펙트럼해석 결과를 통해 얻어진 모드응답들을 조합하여 구할 수 있다. 모드응답 조합방법은 주기모드 응답조합, 강제모드 응답조합, 잔여강제 응답조합으로 분류된다.

주기모드 응답은 이중합 조합식을 사용하며 근접모드가 존재하지 않는 경우에는 제곱합의 제곱근 방법을, 근접모드가 존재하는 경우에는 Rosenbluth 상관계수 또는 Der Kiureghian 상관계수가 적용된 이중합 조합 방법을 사용한다. 강제모드 응답은 일반적으로 대수적으로 조합하나, 주기응답성분과 강제응답성분을 모두 포함한 모드에 대해서는 Gupta 방법 및 Lindley-Yow 방법을 사용하여 조합한다. 잔여 강제응답에 대해서는 누락질량 방법 및 정적 영주기가속도(ZPA, Zero Period Acceleration) 방법이 모드조합 방법으로 사용된다.

주어진 설계지진의 세 방향 성분에 대해 완전해를 구하는 방법으로는 조합방법 A 및 조합방법 B가 허용된다. 조합방법 A의 경우, 주기모드 응답은

영주기가속도보다 적은 주파수영역에 대해 이중합 조합식을 사용하며, 강제모드 응답은 대수합 조합 및 누락질량 방법을 사용하여 조합한다. 조합방법 B는 조합방법 A의 경우와 마찬가지로 영주기가속도보다 적은 주파수 영역에서는 이중합 조합식을 사용하나, 강제모드 응답은 정적 영주기가속도 방법을 사용하여 조합한다.

3.1 세 방향성분의 조합

세 방향 지진성분에 의한 응답조합 방법은 응답스펙트럼 해석방법 및 시간이력 해석방법으로 구분된다. 응답스펙트럼 해석방법이 내진해석에 사용될 경우 최대응답은 제곱합의 제곱근 방법 및 100-40-40 퍼센트 조합규칙을 사용하여 구할 수 있다. 시간이력 해석방법의 경우에는 제곱합의 제곱근 방법으로 조합하여 최대 응답을 구할 수 있으며 세 방향 지진성분이 통계적으로 독립적인 경우에는 대수적으로 더하여 구할 수 있다.

4. 결 론

원자력발전소의 구조물, 계통 및 기기들은 운전기간 중 원자로 냉각재에 의한 열수력 하중에 견디며, 안전정지지진 및 운전기준지진 발생 시 안전기능을 유지하도록 설계되어야 한다. 따라서 원자로 시설의 안전성과 건전성을 확인하기 위한 진동평가 및 동적 내진해석 수행은 매우 중요한 사안이다.

본 논문에서는 원자로 내부구조물의 종합진동평가계획에 대한 규제기술요건 및 내진해석에 필요한 모드응답과 각 방향성분의 조합에 대한 규제기술요건을 소개하였으며, 각각의 기술적 배경 및 규제입장에 대해 소개하였다.

참고문헌

- (1) Regulatory Guide 1.20, 2007, Comprehensive Vibration Assessment Program for Reactor Internals during Preoperational and Initial Startup Testing, US Nuclear Regulatory Commission.
- (2) Regulatory Guide 1.92, 2006, Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis, US Nuclear Regulatory Commission.