

APR+원전 최초 호기의 CVAP 수행에 대한 제언

Proposal for CVAP of First Plant of APR+ NPP

김동학†, 고도영*, 김만원*

Dong-Hak Kim, Do-Young Ko and Maan-Won Kim

Key Words : RVI CVAP(원자로 내부구조물 종합진동평가 프로그램), Non-Prototype Category II(비원형범주 II), Limited Measurements(제한적 측정)

ABSTRACT

The comprehensive vibration assessment program(CVAP) of APR+ nuclear power plant(NPP) is classified as non-prototype, category II with Palo Verde NPP as valid prototype. In this paper, CVAP for first plant of APR+ NPP is proposed. The Control Element Assembly(CEA) shroud of APR+ NPP is different from that of Palo Verde NPP. And the Core Support Barrel(CSB) outer diameter and the flow rate of normal operation of APR+ NPP are larger than those of Palo Verde NPP. Vibration and stress analysis program should be conducted to establish test acceptance criteria. Limited vibration measurement program should be implemented to establish the margin of safety, demonstrate the satisfaction of test acceptance criteria and confirm the similar vibratory response between the APR+ and Palo Verde NPP. Because of the change of normal operation condition, the nominal differences between APR+ and Palo Verde NPP in the structural and hydraulic analysis are studied to determine the measurement locations.

1. 서 론

미국 원자력규제위원회(U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC)는 Regulatory Guide(RG) 1.20⁽¹⁾을 통하여 원자로 내부구조물 종합진동평가 프로그램(reactor vessel internal comprehensive vibration assessment program, RVI CVAP)을 통한 원자로 내부구조물의 진동을 평가하도록 요구하고 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 CVAP는 원형(prototype)과 비원형범주 I~IV(non-protopye category I-IV)로 구분된다.

APR+원전은 표준설계인가 단계에서 CVAP과 관

련하여 비원형범주 II로 분류하여 수행하는 것으로 표준안전성심사보고서에 기술되었다⁽²⁾. 지금까지 국내에 건설된 원전은 비원형범주 I로 분류되어 수행되었으나 APR+원전의 최초 호기는 비원형범주 II로 수행될 예정이다. CVAP는 가동전시험에서 수행되므로 건설공기에 큰 영향을 주고, 원자로 내부구조물의 설계에도 영향을 줄 수 있기 때문에 철저한 준비가 필요하다. 본 논문에서는 APR+원전 최초 호기에서 수행되어야 할 CVAP(비원형범주 II) 수행에 대한 제언을 하고자 한다.

2. 비원형범주 II 수행요건

원형의 경우에는 유일하고 최초의 원전에 대하여 수행하며, 해석, 광범위한 측정 및 전체검사를 수행한다. CVAP이 성공적으로 완료되고, 부정적인 가동중 진동현상이 없는 경우, 유효원형으로 간주된다. 이러한 유효원형과 실질적으로 유사한 경우에는 비

† 교신저자; 정회원, 한수원중앙연구원

E-mail : prfrog@khnp.co.kr

Tel : (042)870-5734, Fax : (042)870-5749

* 한수원중앙연구원

원형범주 I으로 구분된 CVAP을 수행한다. 비원형범주 I CVAP에서는 해석과 함께 광범위한 측정이거나 전체검사를 수행한다. 그러나 유효원형과 유사하지만 구성품의 차이가 있는 경우에는 비원형범주 II CVAP를 수행한다. 비원형범주 II CVAP에서는 해석과 제한적 측정, 전체 검사를 수행한다. 유효원형에서 부정적인 가동중 진동현상이 발생하여 배열이나 설계, 크기, 운전조건이 변경된 경우 조건적 유효원형(conditional prototype)으로 간주된다. 조건적 유효원형에 대하여 제한된 운전경험이 있는 경우, 조건적 유효원형과 본질적으로 동일한 원전은 비원형범주 III으로 구분하여 CVAP를 수행하여야 한다. 비원형범주 III CVAP에서는 비원형범주 II와 동일하게 해석과 제한적 측정, 전체 검사를 수행한다. 변경된 유효원형이나 조건 유효원형이 충분한 만족스러운 운전경험이 있는 경우에는 제한적 유효원형(limited valid prototype)으로 간주된다. 이러한 제한적 유효원형과 본질적으로 유사한 원전의 CVAP는 비원형범주 IV에 따라서 수행한다. 비원형범주 IV의 경우에는 비원형범주 I과 유사하게 해석과 함께 광범위한 측정이거나 전체검사를 수행한다.

APR+원전 최초호기에 대한 비원형범주 II CVAP가 성공적인 수행되면, 후속호기는 비원형범주 IV로 구분되어 수행할 수 있다. 따라서 APR+원전 최초호기에 대한 비원형범주 II CVAP에 대한 철저한 준비로 성공적인 수행이 필요하다.

비원형범주 II CVAP에서는 해석 및 전체검사와 함께 제한적 측정을 수행하여야 한다. 해석 프로그램에서는 원자로 내부구조물의 진동 및 응력해석을 통하여 구조적 차이에 의하여 진동 거동 및 가진력에 대한 큰 영향이 없음을 입증하여야 한다. 또한, 해석 프로그램의 진동 및 응력해석의 결과는 유효원형의 구조 및 유동 특성 및 시험 허용기준을 유효원형과 비원형범주 II 원자로 내부구조물의 차이를 반영하여 수정되어서 비원형범주 II 해석 프로그램의 결과로 결정되어져야 한다.

제한적 측정 프로그램에서는 원형과 동일하게 시험운전조건과 데이터취득계통에 대한 설명이 있어야 한다. 이때 안전여유도를 결정하고 시험허용기준의 만족를 입증할 수 있도록 유효원형에 비하여 변경된 안전에 중요한 원자로 내부 구성품의 진동이나 응력 거동을 정의할 수 있도록 충분하고 적절한 계측이

가능하여야 한다. 또한, 변경되지 않은 안전에 관한 중요한 원자로 내부 구성품에 대해서 유효원형과 유

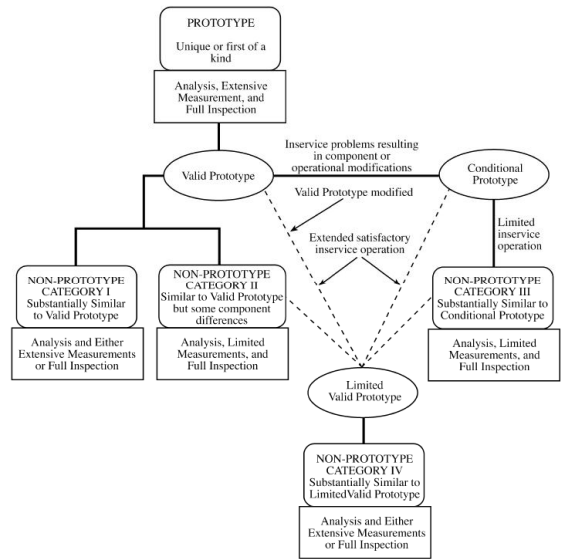


Figure 1 Summary of Comprehensive Vibration Assessment Programs

사한 결과와 일치함을 확인하기 위한 진동거동의 측정이 가능하도록 적절하고 충분한 계측을 하여야 한다.

따라서, APR+의 유효원형인 Palo Verde 1호기와 의 설계변경사항을 분석하는 것은 필수적이다. Table 1은 유효원형인 Palo Verde 1호기에 비교하여 APR+의 설계변경사항을 나타낸다. 설계측면에서 CEA Shroud에 대하여 Inner barrel assembly를 적용하였고, 크기 측면에서 CSB 외경이 163에서 174로 6.7%가 증가하였다. 운전측면에서도 정상운전조건인 유량이 10.3%(155.8→171.9) 증가하였다.

CEA Shroud로의 냉각재 유량은 약 3%미만으로 CEA Shroud의 변경에 따른 유동의 변화는 미미할 것이며, 이에 의한 진동의 변화도 미미할 것으로 판단된다. 그러나, 정량적인 평가를 위한 CEA Shroud로의 유동 및 응력의 변화를 해석적인 방법으로 비교하고, 유동 및 응력의 변화가 큰 곳의 CEA Shroud의 변경에 따른 영향을 측정할 필요가 있을 것이다.

CSB 외경의 증가와 운전조건인 증가에 따른 유동 및 진동특성도 분석이 가능하여야 한다. 이를 위하여 APR+원전의 원자로 내부구조물에 대한 유동

및 구조 해석을 수행한 결과와 Palo Verde 원전의 유동 및 구조 해석결과를 상세 비교하여 유동 특성 및 진동응답 특성이 유사한 위치와 특이한 위치를 고려하여 측정위치와 측정항목을 선정하여야 한다. 여기서, 유사한 위치에서의 Palo Verde 측정결과와 APR+원전 최초 호기의 측정결과를 비교하여 유효 원형의 측정결과와 비원형범주 II원전의 측정결과가 유사하여 유효원형의 시험결과가 APR+원전 최초 호기의 측정결과를 대변할 수 있음을 확인하여야 한다. 또한, 설계변경된 부분 등 특이한 위치에 대하여 변경된 부분에 의한 유동유발진동에 대하여 원자로 내부구조물의 건전성이 유지되며 안전여유도가 확보됨을 입증할 수 있어야 한다.

Palo Verde 원전의 유동 및 구조진동해석결과와 비교하여 설계 변경안의 수립되어야 한다.

참 고 문 헌

- (1) U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2007, Comprehensive Vibration Assessment Program for Reactor Internals During Preoperational and Initial Testing, Regulatory Guide 1.20, Rev. 3, Washington.
- (2) Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd, 2011, APR+ Standard Design Approval(Standard Safety Analysis Report).

Table 1 Design change of reactor internal from Palo Verde to APR+ NPP

Item		Contents
Design	CEA Shroud	Use Inner Barrel Assembly
Size	CSB outer diameter (in)	163→174(6.7%↑)
Operational condition	flow rate of normal operation (X10 ⁶ lbm/hr)	155.8→171.9(10.3%↑)

3. 결 론

APR+원전의 최초 호기의 CVAP는 NRC RG 1.20의 CVAP 수행기준에 의거 비원형범주 II로 수행되어야 한다. APR+원전의 최초 호기에 대한 CVAP에서는 기존 건설원전에서 수행된 CVAP의 해석 및 전체검사와 함께 제한적 측정을 수행하여야 한다. APR+원전의 유동 및 구조진동 해석을 통한 Palo Verde 원전과의 비교분석을 통한 측정위치 및 센서를 결정하고, 제한적 측정을 위한 측정 프로그램을 개발하여야 한다. 충분한 시간에 걸친 측정위치 및 센서의 결정을 위한 유동 및 구조진동 해석을 수행하고, 제한적 측정을 위해 필요한 경우 APR+원전의 최초 호기의 원자로 내부구조물에 대하여 CVAP 측정을 위한 일부 설계 변경이 필요하다. 따라서 주기기 계약 이전에 APR+원전 원자로 내부구조물에 대한 유동 및 구조진동 해석의 수행하고,