

# 신형경수로 1400 미국 원자력규제위원회 설계인증을 위한 원자로내부구조물 종합진동평가프로그램 분류 방안

## Classification Plan of Reactor Vessel Internals Comprehensive Vibration Assessment Program for APR1400 NRC Design Certification

고도영† · 김동학\* · 이재용\*

Do Young Ko, Dong Hak Kim and Jae Yong Lee

### 1. 서 론

신형경수로 1400(APR1400 : Advanced Power Reactor 1400)은 2002년 5월 표준설계인증을 정부로부터 받은 후, 최초 건설 원전인 신고리 3,4호기가 현재 건설되고 있다. 또한, 미국 원자력규제위원회(NRC : Nuclear Regulatory Commission) 설계인증(design certification) 취득을 위해 설계인증 심사서류(DCD : design control document)를 작성 중이고 2013년 중 NRC에 제출할 예정이다.

APR1400 DCD 작성을 위한 필수 규제지침 중 하나인 U.S. NRC R.G.(regulatory guide) 1.20<sup>(1)</sup>은 원전 건설이나 설계인증을 위해 원자로내부구조물(RVI : reactor vessel internals)이 잠재적인 원형(prototype)과의 설계, 운전변수 그리고 운전경험에 따라 분류되고 적절한 종합진동평가프로그램(CVAP : comprehensive vibration assessment program)을 수립하도록 명시하고 있다. RVI CVAP는 원자로 내부의 유동유발진동(FIV : flow-induced vibration)에 의한 원자로의 구조적 건전성과 안전여유도(safety margin)을 확인하는 건설단계의 필수 시험이다.

본 논문에서는 U.S. NRC로 부터 APR1400 DC를 받기 위한 DCD 작성시 RVI CVAP 분류 방안에 대해 검토하고자 한다.

### 2. CVAP 규제지침

RVI CVAP는 유동 및 구조 해석, 진동 및 응력 측정

그리고 감사의 3개 프로그램으로 구성되며, 원형에 의한 유효원형(valid prototype)과의 배열, 설계, 크기, 그리고 운전조건과의 유사성에 따라 원형 또는 비원형범주(non-prototype category) I ~ IV 중 하나로 분류된다.

CVAP과 관련한 U.S. NRC DC를 위해서는 CVAP 분류 방안에 따른 해당 기술보고서가 제출되어 DCD 검토기간 중 승인되어야 한다. 특히, 비원형범주로 분류되면 해당 분류에 대한 정당성을 확인시켜야 한다.

### 3. 해외 원전 NRC DC CVAP 분류

현재 U.S. NRC에 DC를 신청 중인 해외 경쟁사 원전은 프랑스 AREVA사의 U.S. EPR과 일본 MITSUBISHI사의 US-APWR이 있다.

U.S. EPR은 프랑스 N4와 독일 Konvoi 원전 설계를 원형으로 한다<sup>(2)</sup>. 그러나 원형과의 일부 설계변경(Top mounted In-core Instrumentation, Heavy Reflector 설계, 노심깊이 감소, 다운코어 유동교차부 증가, 유동분산장치 추가 등)으로 인한 진동거동의 변화에 대한 확인을 위해 원형으로 분류하였다. 특이할 만한 것은 다른 RCS(reactor coolant system) 배관시스템 뿐 아니라, RSG(re-circulating steam generator) upper internals과 RSG에 부착된 배관시스템 그리고 RSG tube bundle에 대한 진동평가를 추가 수행한 것인데 이것은 NRC R.G. 1.20 Rev.3에서 추가 요구한 진동평가 부분을 반영한 것으로 판단된다. 2009년 CVAP 기술보고서 Rev.0 제출 후 추가정보요청(RAI : request for additional information)에 답변을 위해 2013년 1월 Rev.1을 제출하여 심사 중에 있다.

US-APWR은 장기간 운영경험에 기반한 입증된

† 교신저자; 정회원, 한국수력원자력(주) 중앙연구원  
E-mail : kodoyoung@khnp.co.kr  
Tel : (042)870-5732, Fax : (042)870-5768

\* 한국수력원자력(주) 중앙연구원

4-loop 설계임에도 불구하고, J-APWR 대비 설계변경(Top mounted In-core Instrumentation, Neutron Reflector 설계, 노심길이 증가, 직경 20 % 증가, 유량 30 % 증가, 교차유속 10 % 증가 등)으로 원형으로 분류하였다<sup>(3)</sup>. 2007년 12월 CVAP 기술보고서 Rev.0 제출 후 RAI 대응을 위해 2012년 11월 Rev.3이 제출되어 심사 중이다. 이 보고서에는 증기발생기 내부구조물(SGI : steam generator internals)과 증기관 그리고 급수관은 제외되었다고 명시하고 있다.

#### 4. APR1400 NRC DC CVAP 분류 방안

APR1400은 국내 표준설계인가 심사시 원자로의 분류가 미국의 Palo Verde 1호기를 유효원형으로 하는 비원형범주 I로 인정받아 현재 건설 중인 신고리 3,4호기, 신울진 1,2호기 등 국내에 건설되는 모든 APR1400 원전은 비원형범주 I로 CVAP가 수행된다.

APR1400 NRC DC를 위한 RVI CVAP는 국내 표준설계심사, 건설 및 운영허가와 동일하게 비원형범주 I로 분류하고 NRC DCD를 작성하는 것이 타당하고 판단된다. 그 근거는 다음과 같다.

첫째, Palo Verde 1호기와 이를 유효원형으로 하는 여러개의 비원형 원자로가 미국과 한국에서 운전 중이며 FIV에 의한 어떠한 문제점도 보고된 바 없다. 뿐만 아니라, APR1400의 최초 호기인 신고리 3호기의 RVI CVAP(해석, 검사)에서 어떠한 이상징후도 발견되지 않았다.

둘째, 우리는 선행연구<sup>(4)</sup>에서 APR1400과 Palo Verde 1호기(System 80)의 설계와 운전조건의 비교결과, 주기적 수력하중에 영향을 미치는 RCP(reactor coolant pump) 블레이드 패싱주파수가 동일(120 Hz)하고, 랜덤 수력하중에 영향을 주는 유체속도도 거의 유사하여 설계 및 운전조건에 의한 FIV의 차이는 미미한 것으로 검토되었다. 또한, 크기와 배열 비교결과, 크기는 거의 동일하고 상부안 내구조물(UGS : upper guide structure)의 배열에 일부 차이가 있을 뿐, 주 유로인 노심지지배럴(CSB : core support barrel)과 하부지지구조물(LSS : lower support structure)의 지지조건도 동일하여 FIV에 의한 진동특성은 거의 유사한 것으로 판단했다.

셋째, Table 1에서 보는 바와 같이, Palo Verde 1호기와 APR1400 정상운전시 RVI 최대 응력해석 결과(peak alternating stress) 비교결과, APR1400의 예측값이 모두 적게 계산되었다.

**Table 1 Predicted Stresses of RVI of Palo Verde #1 and APR1400<sup>(5)-(7)</sup>**

Component	Palo Verde #1	APR1400
CSB	5079 psi	1209 psi
UGS	3028 psi	2063 psi
LSS	2770 psi	835 psi

#### 5. 결 론

본 논문을 통해서 APR1400 DCD 작성을 위한 RVI CVAP 분류 방안은 비원형범주 I이 타당함을 알 수 있다. 더욱이 국내 설계인증, 건설 및 운영 인허가를 위한 APR1400 RVI CVAP 분류 비원형범주 I로 인허가 된 바 있으므로, 이에 대한 일관성 차원에서도 비원형범주 I로 NRC DC를 추진하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- (1) U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2007, Regulatory Guide 1.20 Revision 3, Comprehensive Vibration Assessment Program for Reactor Internals During Preoperational and Initial Testing.
- (2) AREVA NP Inc., 2013, ANP-10206NP Revision 1., Comprehensive Vibration Assessment Program for U.S. EPR Reactor Internals.
- (3) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 2012, MUAP-07027-NP(R3), Inc., Comprehensive Vibration Assessment Program for US-APWR Reactor Internals.
- (4) Ko, D. Y., Kim, K. H. and Kim, S. H., 2011, Selection Criteria of Measurement Locations for Advanced Power Reactor 1400 Reactor Vessel Internals Comprehensive Vibration Assessment Program, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration

Engineering, Vol. 21, No. 8, pp. 708~713.

(5) Combustion Engineering Inc., 1985, CEN-263(V)-P Rev. 1-P, A Comprehensive Vibration Assessment Program for Palo Verde Nuclear Generating Station Unit 1 (System 80 prototype), Evaluation of Predictions and Pre-core Hot Functional Measurement and Inspection Programs Final Report.

(6) Ko, D. Y. and Kim, K. H., 2012, Vibration and Stress Analysis of a UGS Assembly for the APR1400 RVI CVAP, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 44, No. 7, pp. 817~824.

(7) Ko, D. Y. and Kim, K. H., 2013, Structural Analysis of CSB and LSS for APR1400 RVI CVAP, Nuclear Engineering and Design, Vol. 261, pp. 76~84.