

APR1400 RVI CVAP 압력경계관통부 건전성 평가

The Structural Evaluations of Pressure Boundary Penetration for APR1400 RVI CVAP

노병욱† · 조정래* · 구자영* · 고도영**

Byeongwook Noh, Chungrae Cho, Jayeong Gu and Doyoung Ko

1. 서 론

원자력발전소를 운영하기 위해 정상운전 및 과도 운전 상태에서 발생하는 유동유발진동(flow induced vibration)으로 인한 원자로내부구조물(reactor internals)의 안전성을 입증해야 하며, 그 방법으로 미국원자력 규제위원회 규제지침(US nuclear regulatory commission regulatory guide, US NRC RG) 1.20⁽¹⁾, "Comprehensive Vibration Assessment Program for Reactor Internals during Preoperational and Initial Startup Testing"을 수행해야 한다. 이러한 실험적 절차를 수행함으로써 원자로냉각재의 유동유발진동에 대한 원자로 내부구조물의 구조적 건전성을 확인하고, 안전여유도(safety margin)를 확보할 수 있다.

국내 신행원자로인 APR1400(advanced power reactor 1400 [MWe])은 인허가와 별도로 CVAP 원천기술 확보 등을 목적으로 RVI CVAP을 Non-prototype Category II로 분류하여 개발하고 있다⁽²⁾. Non-prototype Category II는 해석(analysis), 제한적 측정(limited measurements) 그리고 전체 검사(full inspection)가 수행되어야 한다. APR1400의 경우 CVAP 수행기간 동안 측정에 사용될 계측기를 유동하중으로부터 보호하고, 계측기 탈락으로 인한 이물질 발생을 방지하기 위한 계측기 보호 구조물의 설계와 제작은 반드시 수행되어야 할 사항이다⁽³⁾. 또한 원자로 내부의 계측기와 외부의 측정장비의 경계가 되는 압력경계도 설계와 제작이 수행되어야 한다. 압력경계관통부는 계측기에 연결되

어 원자로 외부로 빠져 나오는 데이터 케이블의 통로로 실제 운전압력을 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 APR1400 CVAP 측정을 위해 설계된 압력경계관통부의 구조적 건전성을 평가하여 설계의 보수성을 입증하고자 하였다.

2. 압력경계관통부의 유한요소해석

2.1 압력경계관통부 구조해석 대상

종합진동평가에 사용될 원자로 압력경계관통부는 CVAP IFA(instrument flange assembly)로 트랜지션 허브(transition hub), 블라인드 허브(blind hub) 및 클램프(clamp)로 구성되며, 제어봉구동장치(control element driving mechanism, CEDM) 노즐 중 98번 예비노즐(spare nozzle)에 설치되어 종합진동평가 기간 중 압력경계관통부 역할을 수행하고, 원자로 고온기능시험 이후 제거되는 임시 부착물 형태의 구조물이다. 이중 블라인드 허브에 장착되는 코낙스피팅(CONAX fitting)은 원자로내부구조물에 장착되는 계측기 케이블을 원자로 외부로 인출하는 통로 역할을 하게되며, 실질적인 압력경계유지부가 된다. 코낙스피팅의 경우 사용환경에 적합하도록 설계된 상용품을 사용하므로 본 평가의 대상에서는 제외하였다. Fig. 1은 원자로 고온기능시험 기간중 설치될 압력경계 관통부인 CVAP IFA의 조립도로 트랜지션 허브와 블라인드 허브가 클램프에 의해 조립되어 씰링(seal ring)에서 압력을 유지하는 형태이다. 압력경계관통부 구성품의 주요 재질과 허용응력을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material Properties at 650°F (Unit: ksi)

Material	Yield Strength	Allowable
SA-479-316(Transition Hub)	18.5	16.7
SA-182-F316(Blind Hub)	18.5	16.7
SA-182-F304(Clamp)	17.9	16.2

† 교신저자; 정회원, 두산중공업

E-mail : byeongwook.noh@doosan.com

Tel : (055)278-5717, Fax : (055)278-8497

* 두산중공업

** 한국수력원자력(주) 중앙연구원

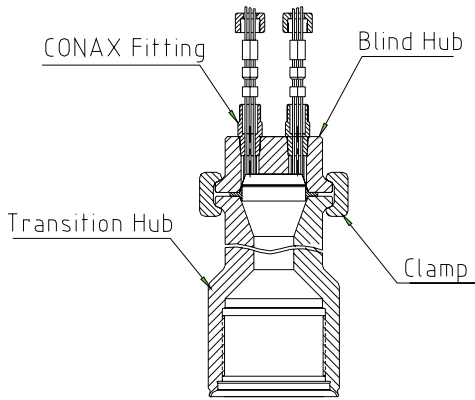


Fig. 1 Section of CVAP IFA Assembly

2.2 유한요소 모델 및 경계조건

압력경계관통부의 유한요소 모델링과 구조해석은 유한요소(finite element) 해석프로그램인 ANSYS를 이용하였다. Fig. 2에 나타난 해석 모델은 CVAP IFA가 실린더형상으로 원주방향의 단면이 모두 동일하고, 내압조건이 모든 단면에 동일한 점을 고려하여 2차원 축대칭모델로 생성하였으며, ANSYS에서 2차원 축대칭 해석모델에 사용 가능한 PLANE42요소를 이용하여 유한요소 모델을 생성하였다. 그림에서 각 컷(cut)은 부위별 평가단면을 나타낸 것이다.

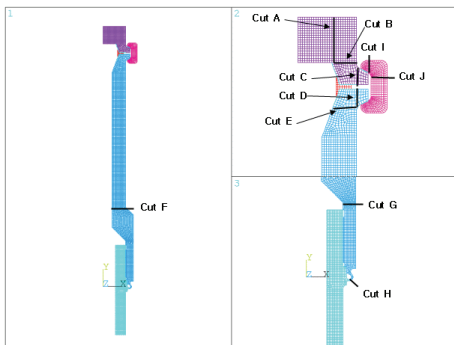


Fig. 2 FE Model of CVAP IFA and Evaluation Locations

구속조건은 제어봉구동장치 노즐 최하단부위에 해당하는 절점(node)을 수직방향(y방향)으로 변위를 구속하였다. 제어봉구동장치 노즐과 트랜지션 허브는 나사산 체결과 등가의 구속조건을 적용하기 위해 나사산에 해당하는 절점의 자유도를 서로 연계하여 경계조건을 설정하였다. 블라인드 허브와 트랜지션 허브는 클램프를 사용하여 서로 체결하며, 두 결합체 사이의 밀봉을 위해 씰링을 사용한다. 각 조립체의 경계에서는 상호 접촉에 의해 하중을 전달

하는 구조로 되어 있으며, 해석 모델에서는 각 경계에 접촉요소인 CONTACT12요소를 이용하여 모델링 하였다. CVAP IFA의 건전성 평가부위는 트랜지션 허브, 블라인드 허브, 오메가씰(Omega seal)과 클램프에서 기본적으로 선택할 수 있는 불연속부위를 채택하였다.

2.2 해석결과

압력경계관통부의 유한요소해석결과 설계조건과 수압시험 조건에서의 설계 여유도를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Design Margin of CVAP IFA (Unit: %)

Location	Design Condition	Hydro Test
Blind Hub	36	45
Transition Hub	54	51
Clamp	49	58

3. 결 론

본 연구에서는 APR1400 원자로의 압력경계를 형성하고 있는 CVAP IFA의 건전성을 평가하였다. 평가결과 설계압력조건 하에서 압력경계관통부인 트랜지션 허브, 블라인드 허브 및 클램프에서 최소 36%이상의 설계여유를 가짐으로 내압에 의해 구조물 전 단면적에 걸친 파손 또는 변형은 없는 것으로 평가되었으며, 수압시험 조건하에서도 건전성을 확보하는 것으로 평가되었다.

4. 참고 문헌

(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, Nuclear Regulatory Commission, Washington, pp. 1~25.

(2) Ko, D. Y., Kim, K. H., Kim, S. H., 2011, Selection Criteria of Measurement Locations for Advanced Power Reactor 1400 Reactor Vessel Internals Comprehensive Vibration Assessment Program, KSNV, Vol. 22, No.8, pp. 708~713.

(3) Noh., B. W., Cho., C. R., Gu., J. Y., Ko., D. Y., 2012, The Structural Evaluation of Protective Hardware for APR1400 RVI Measurement CVAP, Proceedings of KSNV Autumn Conference, pp. 314~315.