

APR1400 RVI CVAP 측정을 위한 임시구조물 건전성 평가

The Structural Evaluation of Protective Hardware for APR1400 RVI Measurement 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 원자로의 구조적 건전성을 확인하고, 안전여유도(safety margin)를 확보할 수 있다.

국내 신형원자로인 APR1400(advanced power reactor 1400 [MWe])은 인허가와 별도로 CVAP 원 천기술 확보등을 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 위해 계측기 보호 구조물의 설계와 제작은 반드시 수행되어야 할 사항이다. 따라서 본 연구에서는 APR1400 CVAP 측정을 위해 설계된 계측기 보호구조물의 구조적 건전성을 평가하여 설계의 보수성을 입증하고자 하였다.

구조적 건전성평가는 변형률계 보호덮개(strain gage cover), 도관 고정구조물(conduit holder assembly) 및 압력계 보호구조물(pressure transducer housing assembly)을 대상으로 하였으며, 구조물의 주요 하중경로(load path)에 대한 허용하중을 산출하였다. 또한 허용하중의 보수성을 확인하기 위해 실제 구조물을 제작한 후 인장시험 형태의 실증시험(mock-up test)을 수행하여 구조물의 허용하중에 대한 건전성을 보증 하고자 하였다.

2. 계측기 보호구조물의 허용하중

2.1 계측기 보호구조물의 허용응력

계측기 보호구조물은 스테인레스강으로 허용인장응력은 항복강도의 1/3 또는 인장강도의 1/5 중 작은 값을 사용했으며, 허용전단강도의 경우 허용인장강도의 0.577배를 사용하였다. 계측기 보호구조물은 원자로내부구조물에 부착한 후 외부하중에 의해 파손과 탈락이 발생할 경우 이물질로 이어지기 때문에 구조물을 분리 시키려고 하는 외부하중에 대하여 충분한 설계마진을 가지고 있어야 하므로 보수적인 설계를 위해 ANSI규격을 적용하여 허용응력을 설정하였다⁽³⁾.

계측기 보호구조물 본체는 SA240 TP304로 제작되며, 구조물을 내부구조물에 고정하는 Tie Rod류는 SA638 Gr660을 사용하였다. 계측기 보호구조물의 주요 재질과 허용응력을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material Properties (Unit: ksi)

Material	Strength		Allowable	
	Yield	Tensile	Tensile	Shear
SA240 TP304	30	75	10	5.77
SA638 Gr660	85	130	26	15

2.2 계측기 보호구조물의 허용하중

계측기 보호구조물의 허용하중은 구조물의 주요

† 교신저자: 정회원, 두산중공업

E-mail : Byeongwook.noh@doosan.com

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

* 두산중공업

** 한수원중앙연구원

하중경로에 해당하는 타이 로드(tie rod), 나사 체결부(thread), 필렛 용접부(fillet welding) 그리고 하중이 전달되는 접촉면(bearing area)을 대상으로 허용응력을 만족하는 인장 또는 전단하중을 산출하고, 그 중 최소하중을 허용하중으로 선정하였다.

Table 2에 각 계측기 보호구조물의 하중경로와 허용하중을 나타내었다.

Table 2 Main Load Path of Gage Protective Hardware

No	Structure	Load Path	Allowable Load (kips/kgf)
1	Strain Gage Cover	Fillet Weld	10.9 / 4,960
2	Conduit Holder	Tie Rod, Locking Nut Bearing Area	4.9 / 2,200
3	Pressure Transducer Holder	Locking Nut	36 / 16,000

2.3 계측기 보호구조물의 Mock-Up Test

계측기 보호구조물의 재질별 허용응력을 기준으로 허용하중을 산출하였고, 허용하중의 보수성을 평가하기 위해 계측기 보호구조물의 Mock-up 시험을 수행하였다. Mock-up은 CVAP 수행시 실제 내부구조물에 부착될 구조물과 동일한 형태와 치수로 제작하였다. 유동하중에 의해 구조물이 파손되는 상태를 실험으로 재현하는 것은 불가능하므로 인장시험 형태의 시험을 수행하여 계측기 보호구조물이 분리되는 최대 파단강도를 찾고자 하였다. 인장시험기에서 계측기 보호구조물에 인장하중을 가하기 위하여 동일재질의 봉재(bar)를 구조물 양면에 용접체결 하였으며 구조물이 분리될 때까지 인장하중을 가하였다. 그 결과 변형률계 보호덮개의 경우 약 8.4톤에서 변형이 시작됨을 확인 할 수 있었으나, 보호덮개가 내부구조물에 부착되는 부위의 필렛 용접부는 건전하였고, 하중을 가하기 위해 보호덮개 상판에 봉재를 용접한 부위에서 파손이 시작됨을 확인하였다. 도관 고정구조물은 약 11톤의 하중에서 Tie Plate의 굽힘변형이 시작되었고, 이후 Tie Rod의 휘어짐이 관찰된 후 그립(grib)용접부에서 파손이 일어났다. 압력계 보호구조물은 약 27톤에서 그립용접부의 파손이 일어났다. 계측기 보호구조물이 분리되어 원자로내부구조물로부터 이탈될 수 있다는 가정으로 Mock-up시험을 수행하였으며 그 결과 구조물의 허용하중보다 상당히 높은 하중에서 파손이

일어남을 확인하였다.

Fig. 1에 각 계측기 보호구조물의 인장시험형태의 Mock-up 시험결과를 나타내었다.

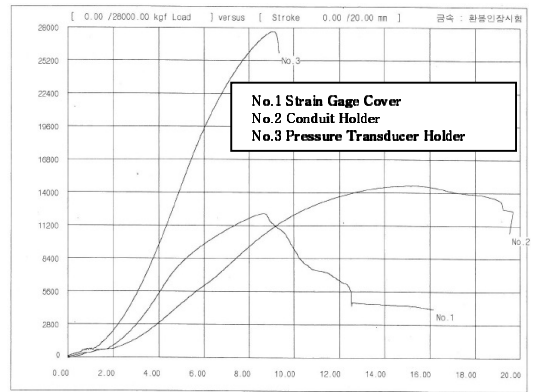


Fig. 1 Tensile Test Results of Gage Protection Structure

3. 결 론

본 연구에서는 원자로 내부구조물에 부착될 계측기 보호구조물의 건전성을 평가하기 위해 구조물의 주요 하중경로에 대한 허용하중을 산출하였고, Mock-up 시험을 통하여 허용하중의 적합성을 검증하였다.

계측기 보호구조물에 대한 인장시험 형식의 Mock-up 시험을 수행한 결과, 실제 파손하중이 보호구조물의 허용하중보다 높은 하중에서 파손이 일어남을 확인하였고, 계측기 보호구조물의 현 설계안이 충분한 보수성을 확보하고 있음을 확인하였다.

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, pp. 708~713.
- (3) ANSI N14.6-1993 "American National Standard for Radioactive Materials-Special Lifting Device for Shipping Container Weight 1000Pounds or more"