

APR1400 RVI CVAP 측정용 보호구조물 건전성 평가 The Structural Evaluation of Protective Hardware for APR1400 RVI Measurement CVAP

노병욱† · 조정래* · 김용구* · 고도영**

Byeongwook Noh, Chungrae Cho, Yonggu Kim 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 고온기능 시험(HFT) 기간 중 수행하여 원자로냉각재의 유동유발진동에 대한 원자로의 구조적 건전성을 확인하고, 안전여유도(safety margin)를 확보할 수 있다.

국내 신형원자로인 APR1400의 경우 CVAP 수행 기간 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 strap), 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 제작

한 후 인장시험 형태의 실증시험(mock-up test)을 수행하여 구조물의 허용하중에 대한 건전성을 보증하고자 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⁽²⁾.

계측기 보호구조물 본체는 A240 TYPE304로 제작되며, 구조물을 내부구조물에 고정하는 Tie Rod 류는 A638 Gr660 및 A453 Gr660을 사용하였다. 계측기 보호구조물의 주요 재질과 허용응력을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material Properties (Unit: ksi)

Material	Strength		Allowable	
	Yield	Tensile	Tensile	Shear
A240 TYPE304	30	75	10	5.77
A638 Gr660	85	130	26	15

2.2 계측기 보호구조물의 허용하중

계측기 보호구조물의 허용하중은 구조물의 주요 하중경로에 해당하는 타이 로드(tie rod), 나사 체결부(thread), 점용접부(spot welding) 그리고 하중이 전달되는 접촉면(bearing area)을 대상으로 허용응력을 만족하는 인장 또는 전단하중을 산출하고, 그 중 최소하중을 허용하중으로 선정하였다.

† 교신저자: 정회원, 두산중공업

E-mail : Byeongwook.noh@doosan.com

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

* 두산중공업

** 한수원중앙연구원

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 Strap	Spot Weld(1EA)	0.017 / 10
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 실증시험을 수행하였다. 실증시험은 실제 내부구조물에 부착될 구조물과 동일하게 제작하였다. 유통하중에 의해 구조물이 파손되는 상태를 실험으로 재현하는 것이 불가능하므로 인장시험형태의 시험을 수행하여 계측기 보호구조물이 분리되는 최대 파단강도를 찾고자 하였다. 인장시험기에서 계측기 보호구조물에 인장하중을 가하기 위하여 도관고정 구조물과 압력계 보호 구조물에는 동일재질의 봉재(bar)를 구조물 양면에 용접체결 하였으며, 구조물이 분리될 때까지 인장하중을 가하였다. 변형률계 보호덮개는 점용접을 고려하여 동일재질의 판재에 보호덮개를 점용접으로 접합한 후 인장시험을 수행하였다. 그 결과 변형률계 보호덮개의 경우 점용접부 1개소당 약 10kgf의 인장강도를 나타내었다. 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.1은 각 계측기 보호구조물의 인장시험 형태의 실증시험결과를 나타낸 것으로 보호구조물의 영구변형을 수반한 파손이 일어날 때까지 인장시험을 수행한 결과이다. Fig.2는 변형률계 보호덮개의 점용접부의 인장시험으로 1열(3 point) 점용접에 대한 인장시험을 수행한 결과이다.

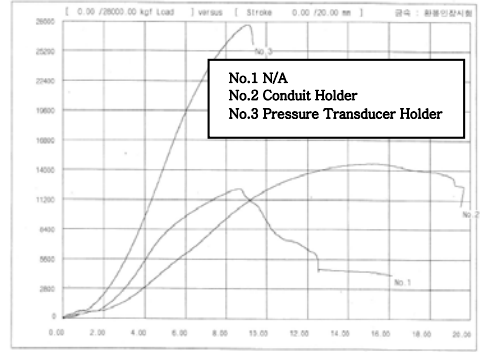


Fig. 1 Tensile Test Results of Gage Protection Structure

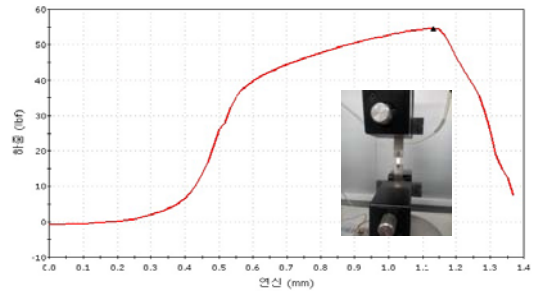


Fig. 2 Tensile Test Results of Spot Weld

3. 결 론

본 연구에서는 원자로내부구조물에 부착될 계측기 보호구조물의 건전성을 평가하기 위해 구조물의 주요 하중경로에 대한 허용하중을 산출하였고, 실증시험을 통하여 허용하중의 적합성을 검증하였다.

계측기 보호구조물에 대한 인장시험 형식의 Mock-up시험을 수행 한 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) ANSI N14.6-1993 “American National Standard for Radioactive Materials-Special Lifting Device for Shipping Container Weight 1000Pounds or more”