

APR1400 RVI CVAP 변형률계 보호덮개 건전성 평가 The Structural Evaluation of Strain Gage Cover for APR1400 RVI CVAP Measurement

노병욱† · 최영순* · 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 원자로냉각계의 유동유발진동에 대한 원자로의 구조적 건전성을 확인하고, 안전여유도(safety margin)를 확보할 수 있다.

국내 신형원자로인 APR1400(Advanced Power Reactor 1400)으로 건설중인 신고리 4호기는 인허가와 별도로 CVAP 원천기술 확보 등을 목적으로 RVI CVAP을 Non-prototype Category II로 분류하였으며, 해석(analysis), 제한적 측정(limited measurements) 그리고 전체 검사(full inspection)가 수행되어야 한다.

CVAP 수행기간 동안 측정에 사용될 계측기는 유동하중으로부터 보호되어야 하고, 계측기 탈락으로 인한 이물질 발생을 방지하기 위해 계측기 보호 구조물의 설계와 제작은 반드시 수행되어야 할 사항이다. CVAP에 사용될 계측기 보호구조물중 원자로 내부구조물에 필렛용접(fillet welding)으로 부착되는 변형률계(strain gage) 보호구조물의 건전성은 본 연구에 앞서 파단시험 형태로 수행된 바 있다⁽²⁾.

필렛용접의 경우 원자로 내부구조물에 작용하는 유동하중에 비해 충분한 강도를 가지는 것으로 평가 되었으나 CVAP 전후의 용접 및 제거작업이 어려우며, 원자로내부구조물 본 품에 손상을 일으킬 수 있으므로, 이에 대한 개선이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 내부구조물의 손상발생을 방지하고, 보다 효율적인 설치/제거를 위해 필렛용접으로 부착되는 변형률계 보호구조물의 설계를 점용접(spot welding)으로 부착하는 보호덮개로 설계를 개선하고, 점용접에 대한 구조적 건전성을 평가하고 입증 하고자 한다.

2. 변형률계 보호덮개의 허용하중

개선된 형태의 변형률계 보호덮개는 스테인레스 박판을 이용한다. 원자로내부구조물에 부착된 변형률계를 스테인레스 박판으로 덮고, 다수의 점용접으로 부착하게 된다.

2.1 재료 물성치

점용접의 특성상 모재가 서로 용착되므로 용접부의 기계적 물성치는 모재와 동일한 304스테인레스 강의 물성치를 이용하였다.

변형률계 보호덮개와 용접부의 기계 물성치를 Table 1에 나타내었다.

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

Material	Yield Strength	Tensile Strength	Modulus of Elasticity, E
SA240 TP304	17.9	63.5	25,050

2.2 점용접의 응력해석과 파괴강도

점용접에 작용하는 하중형태는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 하중의 작용형태에 따라 중첩전단(lap-shear)하중과 교차인장(cross tension)하중으로 나

† 교신저자; 정회원, 두산중공업
E-mail : Byeongwook.noh@doosan.com
Tel : (055)278-5717, Fax : (055)278-8497

* 두산중공업
** 한수원중앙연구원

눌 수 있으며, 각 하중형태에 따라 점용접부의 크기를 변수로 최대 파손하중을 산출할 수 있다.

중첩전단하중 작용시 용접부에 작용하는 하중은 Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 용접부 측면에서의 수직하중이 용접부의 전단응력을 유발하는 형태로 발생된다. 교차인장하중 작용시 용접부에 작용하는 하중은 Fig.1 (b)에 나타낸 바와 같이 용접부 측면과 평행한 하중에 의해 용접부 둘레의 전단응력을 유발하는 형태로 발생된다⁽³⁾.

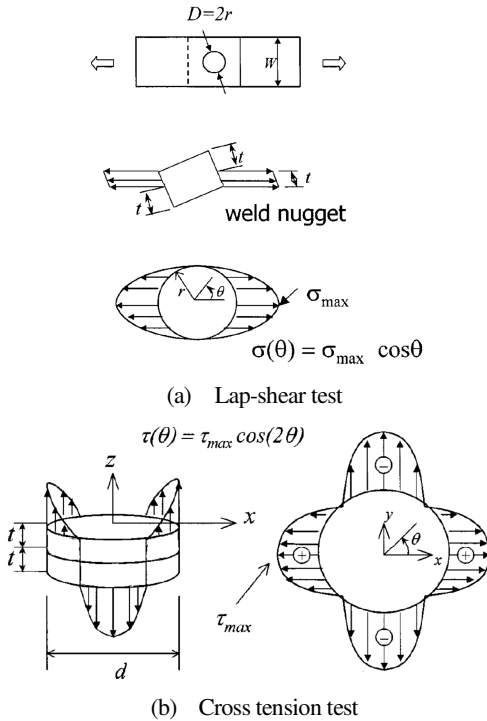


Fig. 1 Assumed stress distribution around the weld nugget

중첩전단의 경우 용착금속 주변의 응력은 Fig. 1 (a)에 나타낸 바와 같이 조화응력(harmonic stress) 형태로 가정할 수 있으며, 식(1)과 같이 하나의 등가하중으로 변환이 가능하다⁽³⁾.

$$P = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sigma(\theta) \cdot \frac{d}{2} t \cdot \cos(\theta) \cdot d\theta = \frac{\pi}{4} t d \sigma_f \quad (1)$$

여기서 P 는 용접부 원방에서 작용하는 인장하중이며, σ_f 는 일반적인 재료의 파괴강도이다.

교차인장의 경우 용착금속 주변의 응력은 Fig.1 (b)에 나타낸 바와 같이 용착금속 주변의 조화전단응력(harmonic shear stress)에 의존하므로 식(2)와 같이 하나의 등가 응력으로 변환이 가능하다⁽³⁾.

$$P = \int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} \tau(\theta) \cdot r t d\theta = t d \tau_f \quad (2)$$

여기서 τ_f 는 재료의 전단강도이며, 인장강도인 σ_f 의 절반에 해당된다.

$$\tau_f = 0.5\sigma_f$$

Table 2는 변형률계 보호덮개의 두께에 따른 점용접부 1개 지점의 파단하중을 산출하여 나타낸 것이다. 변형률계 보호덮개 설치 시 다수의 점용접부가 필요하므로 보호덮개 위치에서 유체압력으로 부터 산출된 유동하중⁽²⁾보다는 큰 값이 산출된다.

Table 2 Fracture strength of spot welding

t(mm)	Lap-Shear lbf(kgf)	Cross Tension lbf(kgf)
0.1	7.73 (3.51)	4.92 (2.23)
0.2	15.45 (7.02)	9.84 (4.47)
0.3	23.18 (10.52)	14.76 (6.70)

3. 결 론

본 연구에서는 원자로 내부구조물에 부착될 변형률계 보호덮개의 설계개선을 제시하였고, 점용접에 작용하는 하중 및 응력형태를 작용하중 형태에 따라 분석하였으며, 이에 따라 산출된 파단하중을 평가 하였다. 점용접부의 파단하중을 산출한 결과, 교차인장하중에 대한 파단하중이 가장 작게 계산되었으나 실제 적용대상부위에는 최소 10개이상의 용접부를 가지게 되므로 변형률계 보호덮개에 작용하는 유동하중에 비하여 실제 허용하중은 상당히 보수적일 것으로 판단된다.

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) 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 the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 314~315.

(3) Yuh J. Chao, 2003, Ultimate Strength and Failure Mechanism of Resistance Spot Weld Subjected to Tensile, Shear, or Combined Tensile/Shear Loads, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol125, pp. 125~132.