

# 원자로 진동 측정용 스트레인게이지에 관한 연구

## A Study on the Strain Gage for Vibration Measurement in Nuclear Reactors

고도영† · 김규형\* · 이재용\*

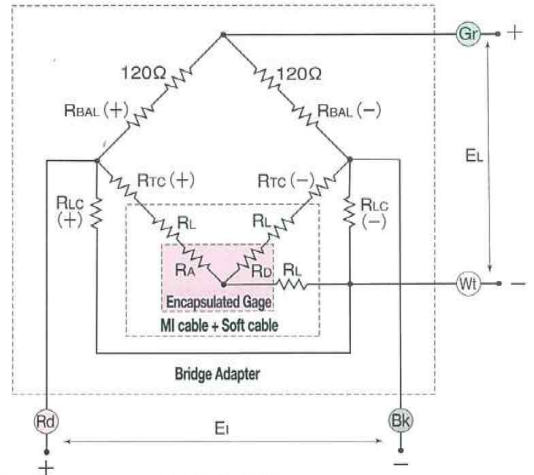
Do Young Ko, Kyu Hyung Kim and Jae Yong Lee

### 1. 서 론

원자로내부구조물 종합진동평가(RVI CVAP : reactor vessel internals comprehensive vibration assessment program)는 원자로가 냉각재의 유동유발진동에 대해 설계수명기간 동안 안전성을 확인하는 시험이다. RVI CVAP는 해석, 측정, 검사 및 평가로 구성되며, 측정은 실제 원자로에 진동 측정을 위한 센서를 설치하여 원자로의 다양한 운전조건에 대해 신호 취득 후 분석하여 진동에 대한 설계 건전성을 해석결과와 비교한다. APR1400 (Advanced Power Reactor 1400) RVI CVAP<sup>(1)</sup> 측정에서는 가속도, 압력 및 변형률을 측정하기 위한 센서가 사용되며<sup>(2)</sup>, 본 논문은 원자로 내부의 고온, 고압 및 고속 유체 환경하에서 사용하는 스트레인게이지 측정 원리와 고온에 의한 데이터 보정 방법에 대해 검토한다.

### 2. 원자로 스트레인게이지의 측정 원리

저항치(R)는 저항체의 길이(L), 단면적(A), 저항재료의 고유저항( $\rho$ )으로 산출된다. 즉,  $R = \rho \times L / A$ 로 표현된다. 여기서, 저항치를 스트레인게이지로 생각하면 스트레인이 변하면 고유저항, 길이, 단면적이 변화한다. 그러나 일반적으로 미세한 스트레인 변화량( $\Delta R$ )을 정확하게 측정하는 것은 어렵다. 따라서 휘트스톤브릿지(Wheatstone bridge) 회로의 원리를 이용해 적은 저항변화도 쉽게 계산해 낼 수 있다.



- RA Active element
- RD Dummy element
- RL Leadwire resistance
- RTC (+), RTC (-) Temp. compensation resistor (sensing part)\*
- RLC (+), RLC (-) Temp. compensation resistor (leadwire)\*
- RBAL (+), RBAL (-) Balance adjustment resistor\*
- EL Bridge output voltage
- Ei Bridge application voltage
- 120Ω Fixed resistor in bridge adapter

Note: Inserted positions of asterisked resistors differ by product.

Fig. 1 Temperature compensation circuit of high temp. strain gage in nuclear reactors

원자로 내부 고온, 고압 및 고속 유체에서의 스트레인 측정을 위해서는 게이지 센싱부(저항소자)가 캡슐로 싸여져 용접되는 고온용 스트레인게이지가 적합하다. Fig. 1은 원자로에 설치되는 고온용 스트레인게이지의 온도보상회로를 나타내었다<sup>(3)</sup>. 더미 게이지 RD는 측정되지 않으므로 게이지의 선펡창계수와 피측정체와의 차이에 의한 출력보상이 불필요하나, 액티브게이지 RA의 선펡창계수와 피측정체와의 차이는 겉보기(apparent) 스트레인이 된다. 이 센싱부 겉보기 스트레인을 보상하기 위해서 외부 온도 보상저항 RTC가 브리지어답터에 삽입된다. 그리고

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

\* 한국수력원자력(주) 중앙연구원

고온의 MI(mineral insulated)케이블에 의한 결보기 스트레인을 줄이기 위해 외부 온도보상저항 RLC가 브리지어답터에 추가된다. 이 RTC와 RLC에 의해 브리지어 불평형이 된 것은 평형조정저항 RBAL로 보정된다. 따라서, 사용자의 운영온도범위에 최적화된 저항으로 조합될 수 있으므로 원자로 내부의 고온 환경에서 보다 정확한 스트레인의 측정이 가능하다.

### 3. 고온 원자로 스트레인 데이터 보정 방법

원자로에 사용되는 스트레인게이지는 온도에 대해 피측정체와의 선팽창계수 차이, 게이지율(gage factor) 변동 등의 원인으로 결보기 스트레인이 발생하므로 반드시 이를 구해 데이터 보정을 해야 실제 스트레인을 계산할 수 있다. 결보기 스트레인을 구하는 방법은 크게 두가지로 실제시편을 전기로에 넣어 온도에 대한 스트레인값을 측정하는 방법과 시험데이터시트에 의한 근사식에 의한 연산으로 구하는 방법이 있다. 두가지 방법에 의한 차이는 크므로 전자에 의한 방법이 보다 정확하지만, 원자로 같이 피측정체가 크거나 실제측정이 불가능할 경우에는 차선책으로 후자에 의해 구한 값을 적용해 사용한다.

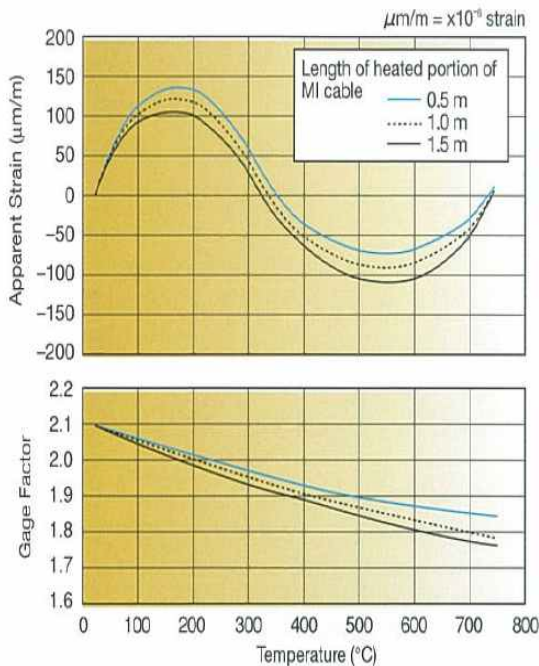


Fig. 2 Estimated thermally-induced apparent strain and gage factor change

온도 T에서의 실제 스트레인( $\epsilon_a$ )은 측정 스트레인 ( $\epsilon_b$ ), 결보기 스트레인( $\epsilon_c$ ), 그리고 게이지율( $K_s$ )을 이용하여 다음과 같은 식에 의해 산출될 수 있다.

$$\epsilon_a(T) = [\epsilon_b(T) - \epsilon_c(T)] \times \left[ \frac{2}{K_s(T)} \right] \quad (1)$$

Fig. 2는 시험데이터시트에 의해 추정된 온도변화에 따른 결보기 스트레인과 게이지율의 변화를 나타낸 예이다<sup>(3)</sup>. 여기서, 원자로 내부 측정시 센싱부 온도가 300°C, 원자로 내부에 고온의 영향을 받는 MI 케이블이 1.0 m 일 때, 측정 스트레인이 1000  $\mu\epsilon$  이라고 가정하면, Fig. 2의 시험데이터시트에서부터 300°C에서의 결보기 스트레인  $\epsilon_c$ 와 게이지율  $K_s$ 는 각각 50과 1.95임을 알 수 있다.

따라서, 위 식 (1)에 의해서 400°C 원자로에서의 실제 스트레인은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_a = [1000 - 50] \times \left[ \frac{2}{1.95} \right] = 989.58 \mu\epsilon$$

### 4. 결 론

원자로 내부의 스트레인을 측정시 MI케이블에서 유도된 결보기 스트레인을 보상하기 위해서는 측정 스트레인에 대한 데이터 보정을 해야 하며, 현실적인 방법으로 시험데이터시트에 의한 근사식에 의해 추정된 값으로 실제 스트레인을 산출할 수 있다.

### 참 고 문 헌

- (1) 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.
- (2) Ko, D.Y. and Kim, K.H., 2013, Design of Vibration and Stress Measurement System for an Advanced Power Reactor 1400 Reactor Vessel Internals Comprehensive Vibration Assessment Program, Nuclear Engineering and Technology Vol. 45, No.2, pp. 249-256.
- (3) www.kyowa-ei.com