

# 미세 변형을 측정하기 위한 스트레인 게이지의 AC 노이즈 감소 알고리즘

이찬\*† · 권태순\*

## AC Noise Reduction Algorithm for Weak Signal Measurement with Strain Gauge

Chan Lee\*†, Tae-Soon Kwon\*

Key Words : CVAP, i-SMR, Structural vibration(구조진동), Strain measurement(변형률 측정), Noise reduction(노이즈 감소), Digital filter(디지털 필터)

### ABSTRACT

This study, conducted as part of 1/5-scale CVAP tests for flow-induced-vibration safety assessment in nuclear power plants, proposes a method for improving the quality of strain measurements in the i-SMR CVAP, providing weak signals compared to conventional cases, by attenuating AC-noise components. In the present work, reference gauges were placed in parallel with the measurement gauge, and strain was recorded simultaneously. The AC noise observed on the measurement gauge and the reference gauges were found to be qualitatively similar; assuming a linear correlation between the noise signals, a proportionality constant was determined and an algorithm was developed to selectively suppress the AC-noise contribution in the measurement-gauge output. In the experimental configuration, the proposed algorithm successfully achieved selective attenuation of the AC-noise, and the improvement was most pronounced when the measurement and reference gauges possessed identical characteristics.

## 1. 서 론

### 1.1 원자력 발전소의 구조진동과 CVAP

CVAP은 Comprehensive Vibration Assessment Program의 약어이며, 원자로 설계시 노심 및 주요 기기에 대해 구조적 건전성을 보장하기 위해 종합적인 구조진동에 대한 평가가 필수적이다<sup>(1)</sup>.

원자력 분야에서 구조진동이 특히 이슈가 되는 파트는 경수로의 증기발생기를 예로 들 수 있다. 증기발생기에서는 고속의 유체가 튜브 다발 내부 및 외부에 흐르기 때문에 이로 인한 구조진동 현상이 발생하며, 그 종류로는 유체탄성불안정(FEI: Fluidelastic Instability), 무작위 난류여기(RTE: Random Turbulence Excitation), 와류 흘림(VS: Vortex

Shedding), 프레팅 마모(FW: Fretting Wear) 등이 있다<sup>(2)</sup>. 증기발생기를 비롯한 원자력 발전소의 각 구성요소들은 설계수명까지의 정상적인 작동을 보장하기 위하여 이와 같은 구조진동에 대응하는 설계가 이루어질 필요가 있으며, 1/5-축소 CVAP 시험은 전산해석평가 모델의 정확도 평가를 위한 실험 데이터를 제공하기 위해 수행된다.

원자력 발전소의 구조물 중 구조진동 문제로 인해 발생한 이슈는 2013년 미국 SONGS(San Onofre Nuclear Generating Station) 원자력 발전소에서 발생한 증기발생기 파손을 예로 들 수 있다. 해당 발전소는 1968년 최초 가동하였고 노후된 증기발생기 부품을 교체하여 2011년 재가동했으나, 재가동 후 약 11개월 만에 증기발생기 내부에서 유출이 발견되어 즉시 가동정지되었다. 조사 결과 부적절한 전열관 지지구조물 설계로 전열관에 과도한 진동이 발생하였고, 이는 과도한 마

\* 한국 원자력연구원 원자로계통안전연구부(KAERI)

† 교신저자, E-mail : chanlee@kaeri.re.kr

모로 이어져 냉각재의 누출이 발생한 것으로 밝혀졌다<sup>(3)</sup>. 그 결과로 운영사 SCE는 2013년 SONGS 발전소의 영구 가동정지를 결정하였다. SONGS 원자력 발전소 폐쇄로 인해 발생한 해당 지역의 발전비용 상승분은 12개월간 3억 5천만 달러에 달하는 것으로 추산된다<sup>(4)</sup>. 이와 같은 막대한 피해를 방지하기 위해 원자로 노심 및 주요 구조물들은 설계 단계에서부터 구조적 건전성에 대한 철저한 검토가 요구된다.

### 1.2 i-SMR CVAP

i-SMR(Innovative Small Modular Reactor)은 지속가능한 발전과 기후변화 대응을 목표로 한국수력원자력에서 개발을 추진중인 신형 경수로 타입 SMR(Small Modular Reactor)로, 520 MWth 급의 출력을 목표로 한다. i-SMR은 주요 구조물 간 대형 배관 연결을 배제한 혁신적인 설계로, 4개의 냉각재 펌프와 1개의 증기발생기, 압력용기 안에 내장된 가압기 등의 설계 등의 특징을 가진다. 이와 같은 설계로 대형 냉각재 상실사고(LBLOCA: Large Break Loss of Coolant Accident)를 원천 차단하는 등의 내재적 안전성을 지니고 있다<sup>(5)</sup>.

이와 같은 iSMR의 설계 특성은 기존의 대형 경수로와 크게 다르기 때문에 구조진동 특성 또한 새롭게 평가될 필요가 있다. 본 논문에서는 현재 진행 중인 i-SMR CVAP 연구과제에서 스트레인 게이지의 측정 품질 향상을 위한 AC(Alternating Current) 노이즈 감쇄 연구를 소개한다.

## 2. 본 론

### 2.1 CVAP 축소모델

Fig.1은 i-SMR의 내부 구조를 나타낸다. 1/5-축소 CVAP 시험장치는 최외각의 격납용기를 제외하고 제작되며, 길이 대비 직경비(L/D :종횡비)가 1인 선형비율을 유지한 채 형상이 보존되어 축소된다. 단, 계측센서의 설치와 신호선 인출을 위한 수정 및 단순 축소시 제작이 불가능할 정도로 얇아지는 부위 등에 일부 수정사항이 적용된다. 구조진동 측면에서의 계측은 요소마다 배치된 가속도계, 동압계, 변형률계(스트레인 게이지)를 통해 이루어진다.

원자로 통합시험장치(ITL: Integral-effect Test Loop) 축소모델의 경우, 열수력적 현상에 대한 모사를 목적으로 한다. 이와 같은 목적을 가진 열수력적 상사에서는 유로의 길이와 직경비를 선형으로 유지해 축소하면 일부 열수력현상의 왜곡이 심화된다. 따라서 이와 같은 장치는 열수력현상의 왜곡을 피하기 위해 구조물 형상의 왜곡을 선택하며, 이를 위해 길이 대 직경비를 재조정한다<sup>(6)</sup>. 이와 같은 설계상의 선택으로 인해 원형로 대비 종횡비가 높아져 길고 가는 형상으

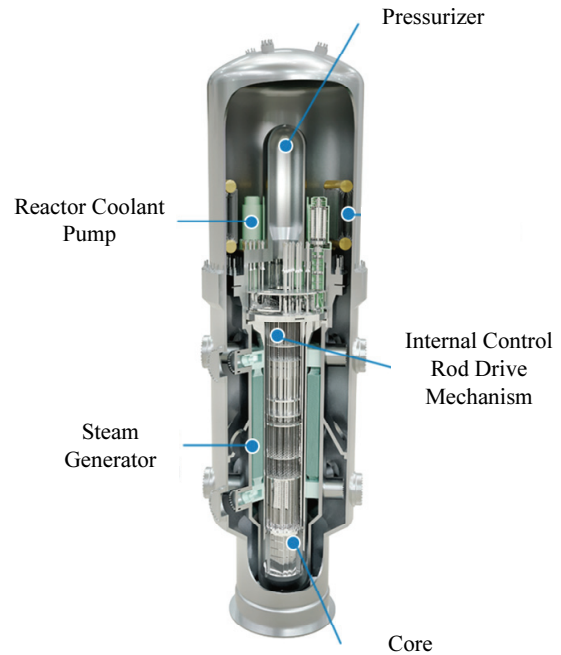


Fig. 1 Schematics for i-SMR internal structures, Picture provided by KHNP

로 변하는 경향이 있다.

이에 반해 CVAP 축소모델은 구조진동의 상사를 주목적으로 하므로 유로뿐만 아니라 구조물의 종횡비도 동일하게 보존하며 원형로 대비 전체적인 형상도 동일하게 보존된다. 또한 i-SMR CVAP 시험장치에서는 ITL과 달리 원형로의 온도와 압력을 보존하지 않는다.

변형률 계측의 측면에서 보면 압력용기 역할을 상징해 설계된 벽면 두께의 비율이 그대로 보존되는 반면 내부 압력은 낮기 때문에 구조적으로 큰 변위가 발생하기 어렵고, 이 때문에 스트레인 게이지에서 측정되는 신호가 작아 신호 품질이 떨어진다는 한계점이 있다. 이를 극복하기 위해서는 스트레인 게이지의 민감도는 높이고, 노이즈는 최소화하기 위한 대책이 필요하다.

본 연구에서는 1/5-축소 CVAP에서 측정되는 구조진동 계측값 중 스트레인 게이지를 사용한 구조적 변형량의 측정에 대해서만 다룬다. 위에서 설명한 변형량이 매우 작은 조건에서 신호 대 잡음비(Signal-Noise ratio)를 높이기 위한 방법으로는 게이지 팩터(GF: gauge factor)를 높이는 방법이 있다. 게이지 팩터는 스트레인 게이지의 물리적 변형량과, 변형과 동시에 발생하는 전기적 저항의 변화량의 비로 정의된다.

일반적으로 시판되는 게이지의 GF는 2 수준이고, 특수 목적으로 GF 100 이상인 실리콘 게이지의 제작 사례가 있다<sup>(7)</sup>. 이와 같은 특수 게이지를 사용하면 계측 민감도가 50 배로 증가하므로 이론상 SN ratio를 크게 높일 수 있으나, 이 경

우 일반적으로 사용되지 않는 제품이기 때문에 비용 뿐 아니라 게이지 자체의 사용성이나 수명, 방수 특성 등에서 추가적인 검증이 요구된다는 문제가 있다. 때문에 본 연구에서는 일반적인 스트레인 게이지를 채택하였다.

## 2.2 스트레인 게이지 측정조건

1/5-축소 CVAP 시험 조건에서 발생하는 변형률을 예측하기 위해 FEM(Finite Element Method) 등의 시뮬레이션 방법을 사용한 구조해석을 활용할 수 있으나, 현 단계에서는 구조해석이 제공되지 않았다. 대신 과거 수행 연구이며 유사 사례인 SMART CVAP의 연구 결과로부터  $10^{-1} - 10^{-2} \mu\epsilon$  수준의 작은 진폭이 측정될 것으로 예측되었다. 이는 통상적인 게이지의 측정범위에 비해 매우 작은 값이므로 24비트 ADC (Analog-Digital Converter)를 갖춘 고성능 NI PXIe-4330 DAS(Data Acquisition System)가 선정되었고, 또한 측정치 자체가 매우 낮은 것을 고려하여 발생할 수 있는 모든 노이즈를 최소화하기 위한 구상이 적용되었다.

측정에 사용된 스트레인 게이지는 TML 사의 QLAB-6-11-6FAILT-F로, 저항  $120 \Omega$  에 GF 2, 인가 전압 9 V, 3선식 쿼터 브릿지 연결로 설정되었다. 전압의 경우, 최대한 민감한 측정을 위해 통상적으로 사용되는 전압 범위보다 높게 설정되었다.

측정용 시편에 사용된 게이지는  $88 \times 19 \times 2 \text{ mm}$  치수의 철판에 부착되었고, 이 철판은 바이스에 물려 고정하였다.

레퍼런스 게이지로는 2종류의 게이지가 사용되었다. 하나는 측정용 게이지와 동일한 모델이고, 하나는 Vishay 사의 CEA-06-125UN-350이다. 후자의 경우 저항이  $350 \Omega$  이며 이의 측정을 위한 설정은 동일하다. 레퍼런스 게이지는

단단한 블록 표면에 설치하였고, 이 블록의 변형량은 거의 0으로 간주할 수 있다. 따라서 2종의 레퍼런스 게이지에서 나타나는 피크는 전부 AC 노이즈로 간주할 수 있다.

Fig. 2는 측정을 위한 계기 연결도 및 AC 노이즈가 유입될 가능성이 있는 경로를 나타낸다. 3개의 스트레인 게이지는 전부 동일한 DAS 모듈의 서로 다른 포트에 연결되었다. 스트레인 게이지의 회로는 DAS 본체로부터 시작되어 도선과 게이지의 그리드 패턴까지 이어져 폐회로를 구성한다. Fig. 2와 같이 복수개의 측정 채널이 구성되는 경우 각 채널의 회로들은 서로 동질적이며 병렬로 작동한다. 이와 같은 구성에서 AC 노이즈가 유입될 가능성이 있는 경로로는 크게 나누어 DAS 본체, 도선, 그리드 패턴의 3 가지 루트가 예상된다.

위의 3개 경로 중 DAS-게이지 구간 도선을 통한 AC 노이즈 유입은 고전류 전력 케이블과 이격하거나 수직 교차시키는 등의 배선 방법 사용 및 실딩 케이블 사용 등으로 회피할 수 있다. 그리드 패턴의 경우 게이지와 측정 표면은 폴리머 필름으로 절연되므로 직접적인 전기적 접촉은 발생하지 않으며, 전자기 유도로 인한 AC 노이즈 유입은 측정물의 외함 접지를 통해 회피할 수 있다. 남아있는 AC 노이즈 유입 경로는 AC 전원 공급 라인으로부터 DAS 모듈 본체를 통하는 루트이며, DAS 모듈은 모든 측정회로의 공통분모에 해당하므로 노이즈의 영향은 모든 채널에 동시에 미치게 된다. 그러므로 이로 인한 노이즈는 모든 채널에서 서로 동일한 위상(in-phase)일 것이며, 그 진폭도 서로 정비례하거나 그에 준하는 관계일 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 3는 3개 채널에서 측정된 시간 신호(time history data)와 PSD(Power Spectral Density)를 나타낸다. 시간 신호의 경우, 각 채널에서 측정된 스트레인의 진폭 데이터를

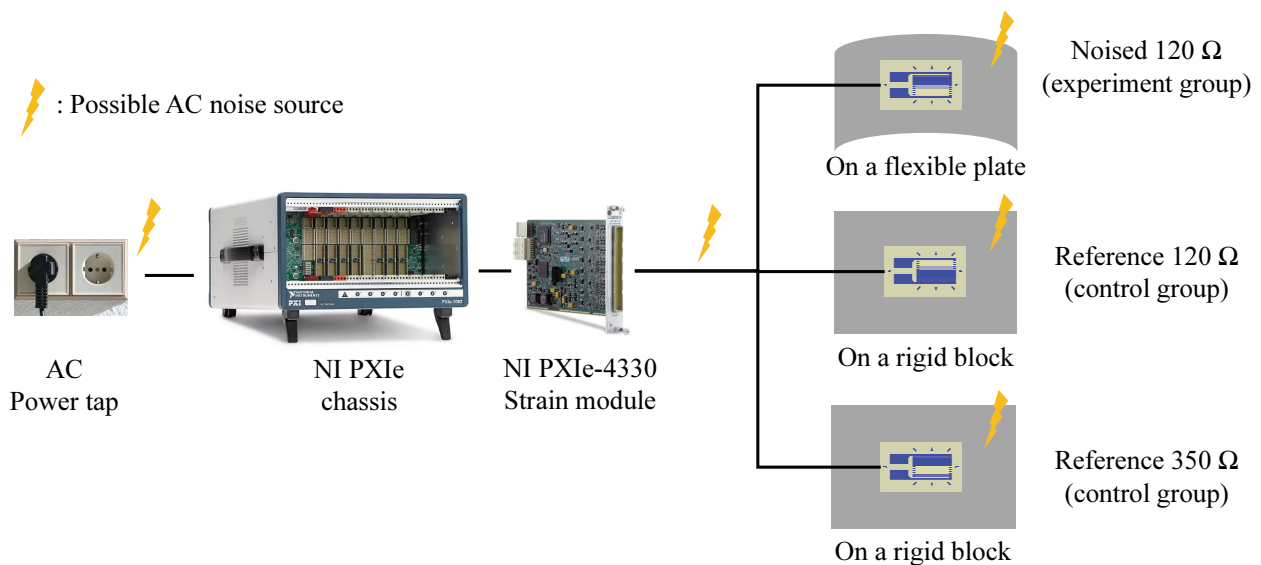


Fig. 2 Instrumentation diagram and possible routes of AC noise entry

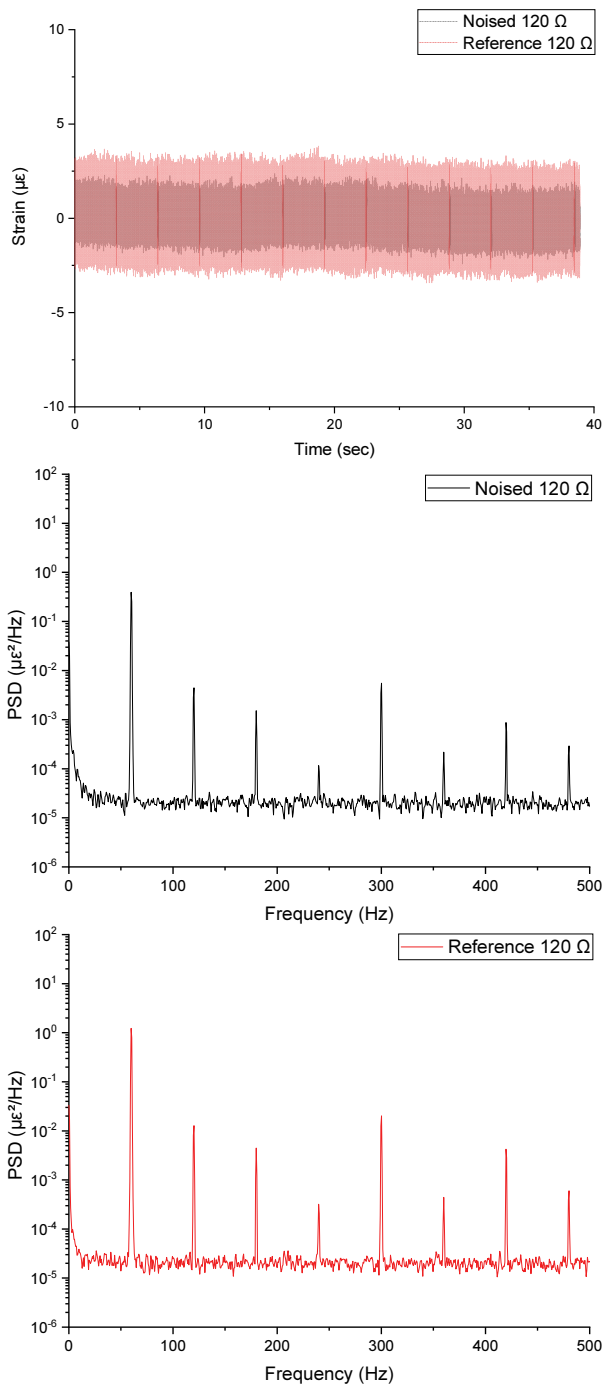


Fig. 3 Sample data acquired from the setup, without mechanical deformation, (top) time history data (mid) PSD of the test group gauge (bottom) PSD of the control group gauge

x축을 시간으로 설정하여 표시하였다. 이때에 측정 속도 (sampling rate)는 5 kHz로 하여 3개 채널을 동시에 측정 및 기록하였다. PSD는 FFT(Fast Fourier Transform)의 진폭을 제공하고 주파수 대역에 대해 정규화해 나타낸 그래프로, 본 연구에서는 구조진동과 연관이 깊은 저주파 대역 500 Hz 이하만을 관심영역으로 하였다.

1개 데이터 블록은 5kHz 샘플링 데이터 8192개로 구성되며 PSD 주파수 해상도는 0.61 Hz이다. 20개 데이터 블록으로 앙상블 평균(ensemble average) PSD를 구하였다.

본 샘플 측정 데이터에서는 측정 표면에 별도의 변형이 발생하지 않는 조건이었으므로, PSD는 대부분 낮은 수치를 유지한다. 하지만 주기적으로 좁은 대역의 피크가 발견되는데, 이는 60 Hz의 배수에서 발견되므로 60 Hz 교류 전원으로 인한 노이즈 및 그 하모닉 피크임을 쉽게 판별할 수 있으며 두 게이지의 PSD를 정성적으로 비교하면 서로 유사함을 확인할 수 있다. 이는 각 채널에서 측정되는 AC 노이즈의 진폭이 서로 정비례 관계에 있을 것이라는 추론을 뒷받침한다.

각 채널의 AC 노이즈가 서로 유사하지만 그 진폭이 다른 이유는 각 채널의 미세한 세팅 편차 때문일 수 있다. 모든 채널에 동일 모델 게이지를 사용해 측정 채널을 구성하더라도 개별 제품의 생산과정에서 발생하는 편차나 회로 연결상 과정에서 발생하는 접촉 저항의 차이 등이 발생할 수 있으며, 영점 설정 과정에서 각 게이지에 가해지는 인가 전압의 미세 조정, DAS 내부적으로 이루어지는 각 채널별 게인값 자동 조정 등의 차이로 인해 개별 채널에 흐르는 전류의 크기가 달라질 수 있기 때문에 AC 노이즈의 진폭 또한 그에 따라 변화할 수 있다.

### 2.3 노이즈 감쇄 방법론

앞에서 설명한 바와 같이 본 논문에서 다루는 AC 노이즈는 교류 전원에서부터 유입되어 발생하며, 회로 설계 개선과 차폐, 접지를 통해 제거하는 것이 통상적인 방법이다. 그러나 시험시설의 특성으로 인해 통상적인 방식으로는 제거에 한계가 있어, 소프트웨어적인 방식을 추가하여 AC 노이즈를 제거하는 방식을 고안하였다.

일반적으로 사용되는 필터로는 특정 대역대의 신호를 감쇄하는 고대역 통과(high-pass) 필터, 저대역 통과(low-pass) 필터, 노치(notch) 필터 등이 있다. 이 중 AC 노이즈의 저감을 위해서는 특정 대역 범위의 피크를 감쇄하는 노치 필터가 용도에 맞으나, 이는 지정된 대역의 피크를 무차별적으로 감쇄하기 때문에 해당 대역에 노이즈가 아닌 유의미한 신호가 있는 경우에는 데이터에 왜곡이 발생할 수 있다는 한계가 있다.

본 논문에서는 이와 같은 한계를 극복하고자, 측정 게이지와 병행하여 레퍼런스 게이지에서 동시에 신호를 측정하고, 그 값을 바탕으로 선택적이고 정량적인 감쇄값을 찾아내는 것을 목표로 하였다.

현 측정 세팅에서는 앞서 소개한 바와 같이 각 게이지에 미치는 AC 전원 노이즈의 영향은 서로 동일한 위상(in-phase)일 것이며, 그 진폭도 정비례하거나 그에 준하는 관계라고 가정하였다.

측정용 시편에 진동이 가해지면 해당 시편에 부착된 게이지에서는 시편의 변형으로 인해 가해진 진동과 시편의 고유진동수 대역에서 광대역의 피크가 발생하며, 여기에 AC 노이즈가 합성된 PSD가 산출된다. 한편 레퍼런스 게이지에는 변형이 발생하지 않으므로, PSD에 나타난 피크는 전부 AC 노이즈라고 간주할 수 있다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$S_{exp}(k) = s(k) + n(k) \quad (1)$$

$$S_{con}(k) = m(k) \quad (2)$$

위 식에서  $S_{exp}$ 는 실험군 게이지에서 측정된 변형률(샘플 변형률)이며,  $S_{con}$ 은 통제군 게이지에서 측정된 변형률(AC 노이즈)이다.

$s(k)$ 는 노이즈가 포함되지 않은 순수한 시편 변형률을 의미하며,  $n(k)$ 와  $m(k)$ 는 AC 전원으로부터 유래된 노이즈를 의미한다.  $k$ 는 측정된 데이터의 일련번호를 의미한다.

위에 설명한 가정으로부터  $n(k)$ 와  $m(k)$ 는 동일한 위상에 있으며, 두 값 사이에는 일정한 비례상수  $r$ 이 성립하고 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$S_{filtered} = S_{exp}(k) - rS_{con}(k) \quad (3)$$

위 식에서  $r$ 은 실험군과 대조군 게이지에서 각각 측정된 AC 노이즈 신호 크기의 비례관계를 나타내는 상수이다.

$r$ 값을 찾아내기 위한 방법으로, 측정된 각 신호로부터 PSD를 계산하고 60 Hz와 그 배수가 되는 하모닉 주파수의 피크 값을 비교하였다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{exp} = p_e(1) + p_e(2) + \dots + p_e(l) \quad (4)$$

$$P_{con} = p_c(1) + p_c(2) + \dots + p_c(l) \quad (5)$$

$P_{exp}$ 는 실험군 PSD에서 AC 하모닉 주파수 피크 값을 의미하고,  $P_{con}$ 은 대조군 PSD에서 AC 하모닉 주파수 피크 값을 의미한다.  $l$ 은 하모닉 차수이다.

위의 수식으로부터 잔차(residual)  $e$ 는 최소자승법으로 다음과 같이 정의되고, 이를 최소화하는  $r$ 을 찾는 것이 목표가 된다.

$$e = (P_{exp} - rP_{con})^2 \quad (6)$$

위와 같은 수식으로부터  $r$  값을 찾기 위해 Labview 코드를 작성하고, 샘플 측정 데이터로부터 그 계산 결과를 도출하였다.

## 2.4 결과

Fig. 4는 측정용 게이지가 부착된 시편에 인위적인 충격을 주는 상태에서 측정된 샘플 데이터의 시간 신호와 PSD를 나타낸다. Fig. 4와 달리 시편에 인위적인 진동과 변형이 가해져 그 결과로 45, 100 Hz 부근에 비교적 좁은 피크가, 180

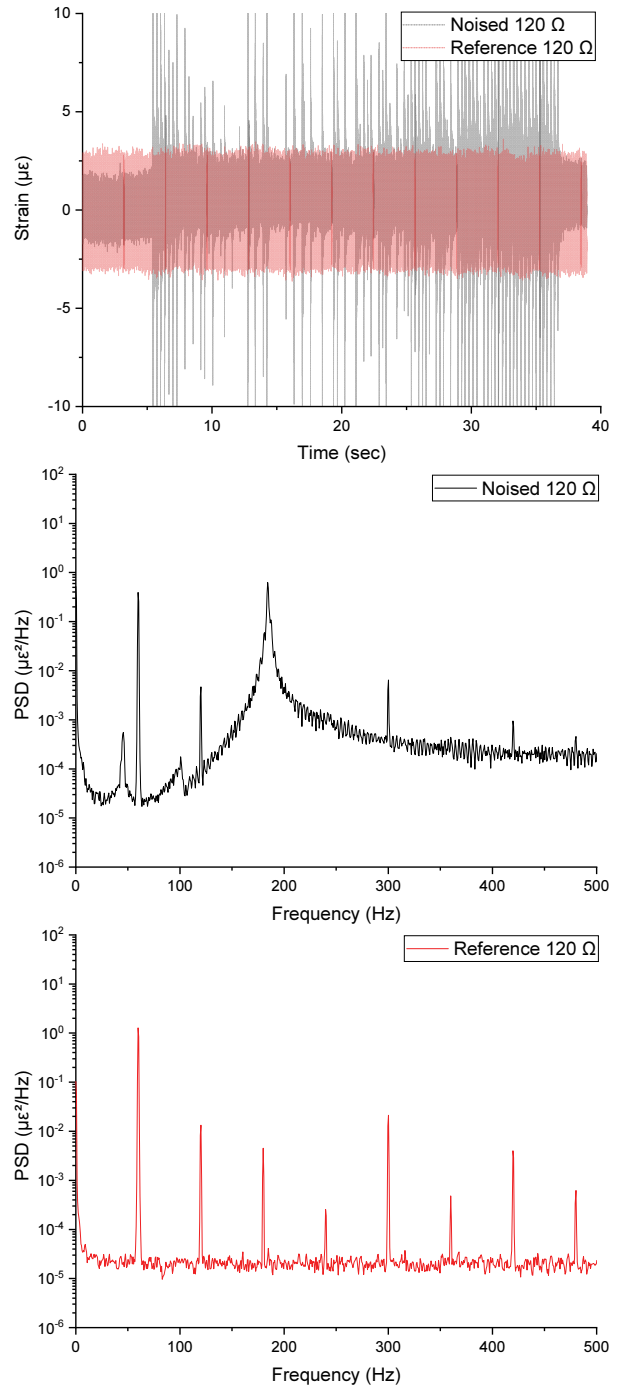


Fig. 4 Sample data acquired from the setup, with mechanical deformation. (top) time history data (mid) PSD of the test group gauge (bottom) PSD of the control group gauge

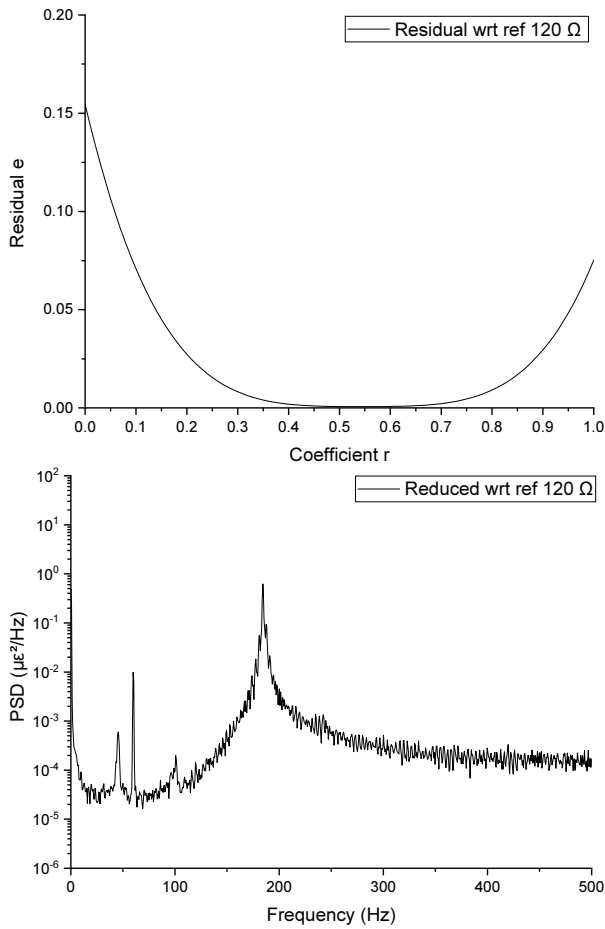


Fig. 5 AC noise reduction with respect to the 120 Ω reference gauge. (top) Coefficient r vs residual e. The residual is at minimum with  $r = 0.54$  (bottom) PSD with AC noise reduced based on the reference signal

Hz 부근에 넓은 피크가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 변형으로 인해 발생한 피크보다 크기가 작은 AC 노이즈는 그 아래 묻혀서 보이지 않는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5의 위에 표시된 그림은 전체 주파수 대역에 대해서  $r$  값을 0.01씩 변화시키며 계산된 잔차  $e$ 의 그래프이다. 이 그래프는  $r = 0.54$ 에서 노이즈 피크를 가장 효과적으로 제거할 수 있음을 알려주며,  $r$ 값은 그보다 큰 범위에서 발산한다.

Fig. 5의 아래에 표시된 그림은 계산된 극소값  $r = 0.54$ 가 적용되어 노이즈가 감쇄된 PSD를 나타낸다. Fig. 4의 가운데 그림과 비교하면 계산 후에도 60 Hz 노이즈는 완전히 사라지지 않지만 그 피크가 약 1/40로 감소하며, 그 외의 하모닉은 대부분 감쇄되어 눈에 띄지 않는 것을 확인할 수 있다. 동시에, 구조 진동으로 인한 스펙트럼은 120, 180, 240, 300 Hz 등 하모닉과 겹치는 경우에도 손상되지 않는 것을 확인할 수 있다.

감쇄 적용 후에도 60 Hz 피크가 남아있는 이유로는 초기 가정과 달리 실제 측정용 게이지와 레퍼런스 게이지 간에 노

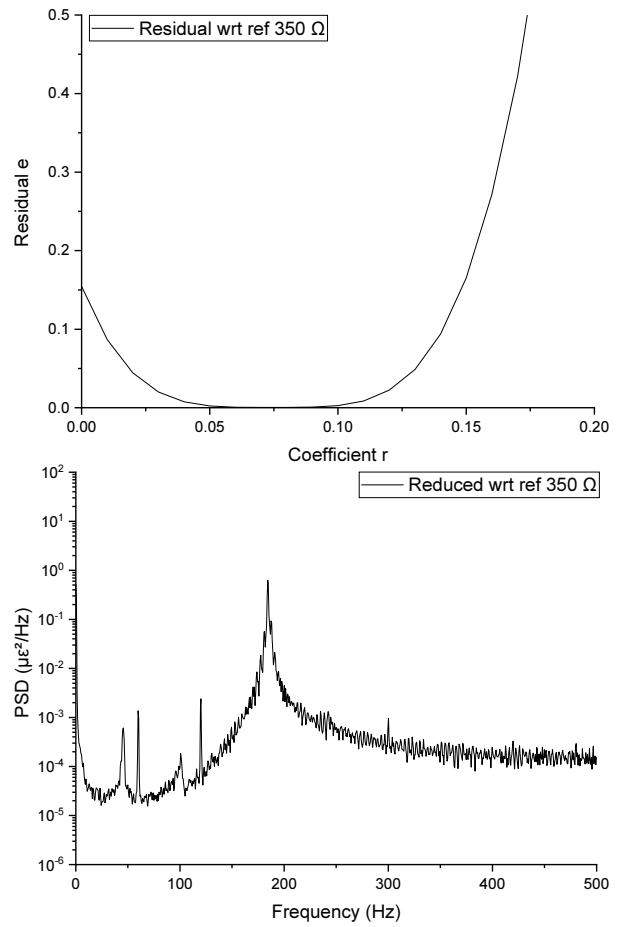


Fig. 6 AC noise reduction with respect to the 350 Ω reference gauge. (top) Coefficient r vs residual e. The residual is at minimum with  $r = 0.07$  (bottom) PSD with AC noise reduced based on the reference signal

이즈 피크값에 완벽한 정비례 관계가 성립하지는 않기 때문에 알고리즘상 일부 주파수 대역에서 완전한 노이즈 감쇄가 이루어지지 않기 때문으로 보인다.

Fig. 6은 앞서와 동일한 방식으로, 120 Ω 대신 350 Ω 레퍼런스 게이지 값을 기준으로 하여 노이즈가 감쇄된 결과를 보여준다. 350 Ω 레퍼런스 게이지를 기준으로 하는 경우, 잔차  $e$ 가 극소값이 되는  $r = 0.07$ 이 확인되었고, 이를 적용한 PSD는 원본에 비해 AC 노이즈 피크가 감쇄된 결과를 나타낸다. 그러나 앞서의 Fig. 5와 비교했을 때, 120, 300 Hz 하모닉 피크가 남아있는 등 노이즈 감쇄의 품질 측면에서는 덜 우수한 결과가 확인된다.

이는 기준으로 삼은 350 Ω 레퍼런스 게이지와 신호를 측정하는 120 Ω 게이지의 전기적 특성이 서로 다르기 때문에, 하모닉별 노이즈 진폭의 비례관계가 동일 게이지끼리 비교할 때에 비해 잘 맞지 않기 때문으로 추정된다.

### 3. 결 론

매우 미세한 스트레인 게이지 신호의 계측 품질을 향상시키기 위하여 AC 노이즈를 선택적으로 제거하는 필터 알고리즘을 고안하여 간단한 측정 데이터에 적용하였다. 본 연구에서는 변형을 신호를 측정하는 실험군 게이지와 별도로, 변형률이 거의 감지되지 않는 대조군 레퍼런스 게이지를 병렬 연결하여 AC 노이즈를 측정하였다.

본 연구에서는 실험군과 대조군 두 게이지에 측정되는 AC 노이즈는 공통된 소스로 부터 유입되므로 기본적으로 동일한 특성을 지니고 있으며, 그 크기에도 선형적 비례관계가 있다고 가정하였다. 이와 같은 가정 하에 두 노이즈의 크기 비율을 나타내는 비례상수  $r$ 을 찾고, 이 값을 레퍼런스 게이지에 곱하여 신호 게이지로부터 차감하는 방식으로 노이즈를 감쇄하였다.

AC 노이즈가 있는 환경에서 시험장치를 구축하고 측정된 데이터로 테스트해 본 결과, 실험군과 대조군에서는 실제로도 매우 유사한 패턴의 노이즈가 측정되었고 선형적 비례관계를 가정한 노이즈 감쇄는 효과적으로 AC 하모닉 노이즈를 제거하였다. 기본 주파수 60 Hz의 노이즈가 제거되지 않는 것은 두 게이지 간 노이즈의 선형성이 완벽하지는 않기 때문으로 추정되며, 실험군과 대조군에 동일 모델의 게이지를 사용했을 때 더 나은 결과가 나오는 것을 확인하였다.

### 후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 혁신형

소형 모듈 원자로기술개발 사업단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00408520).

### References

- (1) 2017, "US NRC Regulatory Guide (NUREG) 1.20, Rev.04, Comprehensive Vibration Assessment Program for reactor internals during preoperational and startup testing"
- (2) 2007, "Appendices N-1300, ASME Section III Division I, Flow-induced vibration of tubes and tube banks"
- (3) Arnie Gundersen, 2012, "San Onofre's Steam Generator Failures Could Have Been Prevented, Fairewinds Associates"
- (4) 박우영, 심주형, 2016, "San Onofre 원전 폐쇄가 전력시장에 미친 영향", 세계 원전시장 인사이트, 에너지경제연구원, Sep 23.
- (5) Han Ok Kang, Byung Jin Lee, Sang Gyu Lim, 2024, "Light Water SMR Developments Status in Korea", Nuclear Engineering and Design, Vol. 419.
- (6) M.Ishii, I. Kataoka, 1984, "Scaling Laws for Thermal-hydraulic System Under Single Phase and Two-phase Natural Circulation", Nuclear Engineering and Design, Vol. 81.
- (7) Bofan Hu, Dian Xu, Yuting Shao, Zhongyi Nie, Pengchuan Liu, Jinbao Li, Lianjie Zhou, Pei Wang, Ningge Huang, Junhan Liu, Yifei Lu, Zhongyuan Wu, Bo Wang, Yongfeng Mei, Mengdi Han, Rui Li, Enming Song, 2024, "Ultrathin Crystalline Silicon-based Omnidirectional Strain Gauges for Implantable/wearable Characterization of Soft Tissue Biomechanics", Science Advances, Vol. 10.