

# 위상 시계열 마이크로 도플러 분석을 이용한 Dwell 모드 위성 SAR 기반 교량 고유진동수 추정

## Estimating Bridge Natural Frequencies Using Phase Time-Series Micro-Doppler Analysis with Dwell-Mode Satellite SAR

유용선 · 채수빈 · 임태정\* · 이우경

Yong-Sun Yoo · Subin Chae · Taejeong Lim\* · Woo-Kyung Lee

### 요 약

본 연구에서는 ICEYE 위성의 Dwell 모드 SAR(synthetic aperture radar) 데이터를 활용하여 교량 구조물의 고유진동수 추정 가능성을 실증하였다. 교량 진동에 의해 유도된 마이크로 도플러(micro-Doppler) 성분을 분석하기 위해, 하위 개구(sub-aperture) 기반 영상화 기법을 적용하여 시간 분해능을 갖는 복소 영상 시계열을 구성하였다. 또한 하위 개구 영상 간 정합 및 다중 산란체의 위상 신호에서 저차 다항식 모델 기반의 추세 제거를 수행하여 잔여 오차를 보정함으로써 진동 분석의 정밀도를 확보하였다. 분석 결과, 도출된 고유진동수는 가속도계 기반의 측정치와 높은 일치성을 나타냈다. 본 연구는 위성 SAR 기반의 원격 탐사 기법이 대형 구조물의 건전성 모니터링(SHM, structural health monitoring)을 위한 유효한 도구로 활용될 수 있음을 시사한다.

### Abstract

This study explores the feasibility of estimating the natural frequency of bridge structures using ICEYE Dwell-mode synthetic aperture radar (SAR) data. Sub-aperture imaging was employed to construct a complex image time series for analyzing the vibration-induced micro-Doppler components. To ensure precision, residual errors were mitigated through registration between the sub-aperture images and low-order polynomial detrending of multi-scatterer phase signals. The estimated frequency was found highly consistent with accelerometer-based measurements. These findings demonstrate the viability of satellite SAR as a remote, non-contact tool for structural health monitoring (SHM).

Key words: Structural Health Monitoring (SHM), Synthetic Aperture Radar (SAR), Dwell Mode, Micro-Doppler, Sub-Aperture

### I. 서 론

교량과 같은 대형 구조물의 구조적 건전성 관리(SHM,

structural health monitoring)는 공공 안전 확보를 위한 핵심 과제로서, 구조물의 동적 특성을 지속적으로 관측하고 이상 징후를 조기에 탐지하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히

「본 연구는 2025년 한국건설기술연구원 주요사업 위성 SAR 기반 인프라 재해 대응 기술 개발(1/3)((25주요-대1-임무), 과제번호: 2025-0285)과 행정안전부의 급경사지 안전관리를 위한 드론 기반 SAR 모니터링 시스템 개발 사업(과제번호: RS-2025-02633421)의 지원을 받아 수행되었습니다.」

한국항공대학교 항공전자정보공학과(Department of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University)

\*한국건설기술연구원 구조연구본부(Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

· Manuscript received January 7, 2026 ; Revised January 21, 2026 ; Accepted February 19, 2026. (ID No. 20260107-19S)

· Corresponding Author: Woo-Kyung Lee (e-mail: wklee@kau.ac.kr)

교량의 고유진동수는 구조 강성 변화나 손상 발생에 민감하게 반응하는 대표적인 지표로, 장기적인 모니터링을 통해 구조 상태를 평가하는 데 중요한 정보를 제공한다<sup>[1]</sup>. 기존에는 가속도계 등 접촉식 센서를 이용한 측정이 주로 활용되었으나, 대규모 교량 구조물 전반에 대한 센서 설치 및 유지관리에는 비용과 접근성 측면에서 한계가 존재한다. 이러한 배경에서 비접촉 원격 측정 기술을 활용한 구조물 진동 모니터링 기법에 대한 관심이 증가하고 있다<sup>[2]</sup>.

합성개구레이다(SAR, synthetic aperture radar)는 기상 조건과 주·야간 무관하게 관측 가능하며, 정밀한 위상 정보를 포함하는 복소(complex) 신호를 획득할 수 있는 원격 탐사 기법이다<sup>[3]</sup>. 구조물이 진동과 같은 주기적인 미세 운동을 수행할 경우, 레이더와 산란체 사이의 유효 거리 변화가 발생하고, 이는 수신 신호의 위상이 시간에 따라 변조된 형태로 반영된다. 이러한 위상 변조는 구조물의 미세 운동에 의해 유도되는 마이크로 도플러(micro-Doppler) 효과로 해석될 수 있다<sup>[4]</sup>.

SAR 관측 데이터는 관측 지역에 대해 일정 시간 동안 반복적으로 수집된 복소 신호의 집합으로 구성되므로, 진동하는 특정 산란체에서 추출된 위상 시계열에는 미세 운동에 따른 변조 성분이 누적되어 포함된다. 따라서 위상 시계열을 시간-주파수 영역에서 분석함으로써 구조물의 진동에 의한 주파수 성분을 식별할 수 있으며, 이는 교량의 고유진동수 추정에 활용될 수 있다. 최근에는 고해상도 위성 SAR 데이터를 기반으로 교량 상판의 특정 산란체에서 마이크로 도플러 성분을 추출하고, 이를 통해 교량의 진동 특성을 관측하려는 연구들이 보고되고 있다<sup>[5]</sup>.

이러한 위상 시계열 기반 분석을 효과적으로 수행하기 위해, 하위 개구(sub-aperture) 기반 영상화 기법이 활용될 수 있다. 해당 기법은 단일 SAR 관측 데이터로부터 시간적으로 연속된 복소 영상 시계열을 생성할 수 있어, 구조물 진동에 따른 마이크로 도플러 성분을 시간 축에서 분석할 수 있는 기반을 제공한다. 더 나아가, 이러한 시계열 분석 과정에서 단일 산란체 분석을 넘어 다중 산란체에서 추출된 정보를 종합적으로 활용하는 접근은 교량 진동수 추정의 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 실증 지역에 대해 획득된 ICEYE 위성의 X-band dwell 모드 단일 패스(single-pass) CPHD(com-

plex phase history data)를 통해 교량 영역을 대상으로 하위 개구 기반 영상화를 수행하고, 각 하위 개구 영상으로부터 위상 이력 신호를 추출하여 시계열 분석을 수행한다. 아울러 시계열 영상 간 서브픽셀 정합과 다중 산란체 기반 위상 추세 제거를 결합하여, 진동 성분 추출에 영향을 줄 수 있는 정합 오차와 배경 위상 성분을 억제한다. 또한 다중 산란체에서 추출한 위상 시계열 정보를 종합하여 스펙트럼 기반으로 고유진동수를 추정하고, 지상 가속도계 측정 결과와의 비교를 통해 제안 절차의 타당성을 실증적으로 검증한다.

## II. 데이터 및 처리 방법

### 2-1 하위 개구 기반 복소 영상 시계열 구성

위성 SAR 운용에서 Dwell 모드는 안테나 빔의 지향 각도를 정밀하게 제어함으로써, 특정 관심 영역을 장시간 지속적으로 조사(staring)하는 고도화된 운용 방식이다<sup>[6]</sup>. 해당 기법은 일반적인 spotlight 모드 대비 극대화된 관측 시간(dwell time)을 확보할 수 있어, 구조물의 미세 진동에 의해 유도되는 마이크로 도플러를 정밀하게 분석하기 위한 장시간의 복소 신호 획득이 가능하다<sup>[7]</sup>.

SAR 데이터에서 마이크로 도플러 성분을 추출하기 위한 여러 접근 방식이 존재하지만, 본 연구에서는 공간적 식별과 시간적 분석을 동시에 수행하기 위해 하위 개구 영상화를 통한 복소 영상 시계열 구성 방식을 채택하였다. 이는 수집된 전체 관측 데이터(full-aperture)를 관측 시간에 따라 일정한 시간 간격을 갖는 하위 구간들로 분할하고, 각 구간에 대해 개별적인 복소 영상을 생성하는 방식이다. 이 과정에서 각 하위 개구 영상은 시계열 샘플 역할을 수행하며, 영상 간의 시간적 간격은 진동 분석 과정에서 시간 해상도를 결정하게 된다.

본 연구에서는 특정 관심 영역에 대한 국부적 영상화로 연산 효율을 높일 수 있고, 데이터 부분 집합의 독립적 처리가 가능하여 하위 개구 시계열 구성에 유연성을 제공하는 후방 투영 알고리즘(BPA)을 영상 형성에 적용하였다. 그림 1은 하위 개구 영상화를 통해 관측 시간 순서에 따라 중첩된 하위 개구 구간으로부터 복소 SAR 영상 시계열을 구성하는 개념을 도식적으로 보인다.

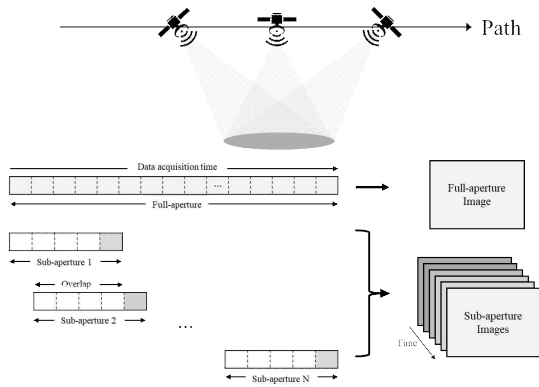


그림 1. 하위 개구 SAR 영상화 개념도  
Fig. 1. Concept of sub-aperture SAR imaging.

## 2-2 마이크로 도플러 분석 기반 고유진동수 추정

복소 영상 시계열로부터 교량의 고유진동수를 추정하기 위해, 먼저 영상 내 주요 산란체들을 활용하여 시계열 영상 간 서브 픽셀 단위의 정합을 수행한다. 이를 통해 영상 형성 과정에서 누적될 수 있는 시계열 영상 간 정합 오차를 보정하여, 동일 산란체에 대한 위상 시계열을 안정적으로 추출할 수 있도록 한다.

이후 교량 고유진동수 추정을 위해 교량 상판의 진동 특성을 대표하는 산란체들을 분석 대상으로 선정하며, 정합이 완료된 복소 영상 시계열의 특정 시간 축에 해당하는  $k$  번째 프레임에서, 특정 산란체 위치  $r = (x, y)$ 의 신호는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$s_k(r) = A_k(r) \exp(j\phi_k(r)) \quad (1)$$

여기서  $A_k(r)$ 는 진폭 성분이며,  $\phi_k(r)$ 는 해당 시점에서의 위상 성분으로 구조물의 미세 변위와 직접적인 상관 관계를 가진다. 레이더와 산란체 사이의 거리가 진동에 의해 미세하게 변화하면, 수신 신호의 위상은 해당 거리 변화에 비례하여 변조된다. 이는 레이더 파장( $\lambda$ )과 산란체와의 유효 거리( $R_k$ )를 이용해 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$\phi_k(r) = \frac{4\pi}{\lambda} R_k \quad (2)$$

따라서 교량의 미세 진동은 마이크로 도플러 효과로 해석될 수 있으며, 이는 위상 시계열 내의 주기적인 변화로 기록되어 진동 주파수 식별의 기반이 된다.

다만 기하 정합을 통해 동일 산란체에 대한 공간적 일관성을 확보하였더라도, 실제 위상 시계열  $\phi_k(r)$ 에는 교량의 진동에 의한 마이크로 도플러 성분 외에도 미세 궤도 오차, 대기 지연 변화 등에 기인한 잔여 위상 오차가 포함될 수 있다. 이를 정밀하게 분석하기 위해 위상 성분을 다음과 같이 분해하여 모델링하였다.

$$\phi_k(r) = \phi_k^{vib}(r) + \phi_k^{trend}(r) + n_k(r) \quad (3)$$

여기서  $\phi_k^{vib}(r)$ 는 교량 진동에 의한 위상 변화량이며,  $\phi_k^{trend}(r)$ 는 잔여 위상 오차로 인한 저차(low-order) 추세 성분,  $n_k(r)$ 는 잔차 및 잡음을 의미한다.

본 연구에서는 앞서 선정된 다중 산란체의 위상 변화에 대한 공통적인 위상 추세 성분을 저차 다항식으로 근사하였다. 이러한 다중 산란체 기반의 추세 제거는 개별 산란체의 국부적 잡음을 효과적으로 억제하며, 결과적으로 정밀한 진동 분석을 수행하기 위한 강건한 위상 기준점을 확보하게 한다. 이렇게 보정된 위상 시계열 함수를  $\tilde{\phi}_k(r)$ 로 정의한다. 보정된 위상 함수의 고유진동수를 추정하기 위해 Welch PSD(power spectral density) 분석을 적용하였다. Welch 방법은 시계열 신호의 구간별 평균화를 통해 스펙트럼의 분산을 감소시킴으로써, 잡음 환경에서도 고유진동수를 안정적으로 식별할 수 있게 한다. 최종적으로 단일 산란체 분석의 민감도를 극복하고 결과의 신뢰성을 확보하기 위해, 선정된 다중 산란체의 스펙트럼을 평균 결합(stacking)함으로써 교량의 고유진동수를 도출하였다.

본 연구에서 제안하는 교량 고유진동수 분석을 위한 전체 분석 절차는 그림 2와 같다.

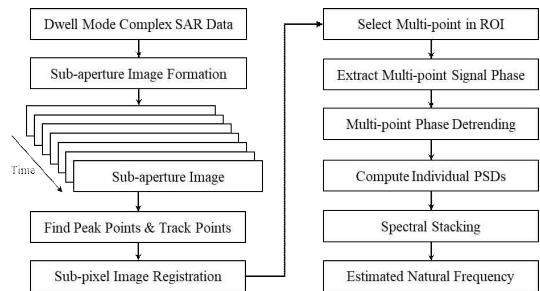


그림 2. 하위 개구 영상 기반 고유진동수 추정 흐름도  
Fig. 2. Flowchart of natural frequency estimation based on sub-aperture images.

### III. 분석 및 결과

#### 3-1 실증 데이터 및 분석 환경

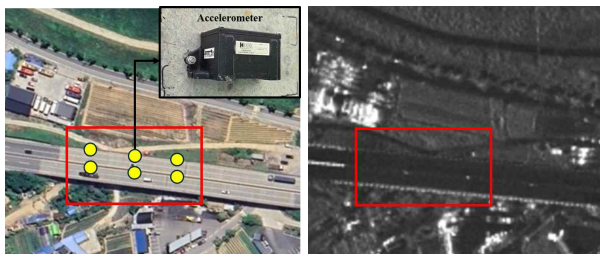
본 연구의 제안 기법을 검증하기 위해 충청남도 아산시에 위치한 갈매교를 대상으로 실증 분석을 수행하였다. 지상 계측 데이터와의 비교 검증을 위해 교량 상판의 주요 지점에 총 6개소의 가속도계를 설치하였으며, 100 Hz의 샘플링 주파수로 데이터를 취득하였다. 이때 분석을 위해 가속도계 설치 위치를 기준으로 SAR 영상 내 교량 상판의 산란 특성이 우수한 지점들을 선별하여 분석에 활용하였다.

제안 기법의 검증을 위한 SAR 데이터는 ICEYE 위성의 X-band dwell 모드 데이터를 사용하였다. 그림 3은 실증 지역의 광학 영상과 SAR 영상을 보이며, 교량 상판 내 설치된 가속도계 사진과 위치를 분석에 사용된 관심 영역을 함께 표시하였다. 구체적인 SAR 시스템 및 분석 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. SAR 시스템 및 분석 파라미터

Table 1. SAR System and analysis parameters.

Operation mode	Dwell fine
Center frequency	9.6 GHz
Polarization	VV
Dwell time [ $T_{obs}$ ]	27 s
PRF	6,991 Hz
Sub-aperture pulse [ $N_{sub}$ ]	1,500
Overlap ratio [ $\rho$ ]	95 %



(a) 실증 지역 광학 영상  
(a) Optical image with ROI  
(b) 실증 지역 SAR 영상  
(b) SAR image with ROI.

Derivative © 2025 ICEYE Oy.

그림 3. 실증 지역 및 관심 영역(ROI)

Fig. 3. Test site and region of interest (ROI).

하위 개구 영상 간 시간 간격은 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\Delta t = N_{sub}(1-\rho)/PRF \quad (4)$$

표 1의 값을 적용하면  $\Delta t \approx 0.0107s$ 로 계산되며, 이는 일반적인 교량의 최대 고유진동수 대역보다 충분히 큰 관측 주파수를 제공할 수 있다. 또한 측정 가능한 주파수 분해능은 관측 시간  $T_{obs}$ 에 반비례한 값을 갖는다.

#### 3-2 교량 고유진동수 추출 및 결과 검증

제안 기법의 검증을 위해, 동일한 시간대에 확보된 데이터를 기반으로 비교 분석을 수행하였다. 그림 2의 과정을 통해 도출된 교량의 고유진동수 결과는 그림 4와 같으며, 이때 각 결과를 최대치 정규화하여 주파수 영역에서의 일치 여부를 확인하였다.

분석 결과, 6개 지점의 가속도계 데이터를 평균한 기준 고유진동수는 2.80 Hz로 식별되었으며, 제안 기법을 통해 추정된 값은 2.76 Hz로 나타났다. 이는 교량 실측 데이터에서 지배적으로 나타나는 고유진동수에 대해 동일한 주파수 특성을 식별했음을 보여주며, 지상 계측 데이터와 제안 기법의 높은 일치성을 입증한다.

다만, 본 연구의 분석 과정에서 제안 기법은 응답 크기가 작은 모드에 해당하는 고유진동수에 대해서는 식별이 제한적이라는 한계가 존재하였다. 이는 미세 고주파 진동 성분을 분리하기 위한 주파수 해상도의 제약 및 시스템 잡음 등에 기인한 것으로 보이며, 향후 연구를 통해 고차 모드 검출 가능성을 확인하고자 한다.

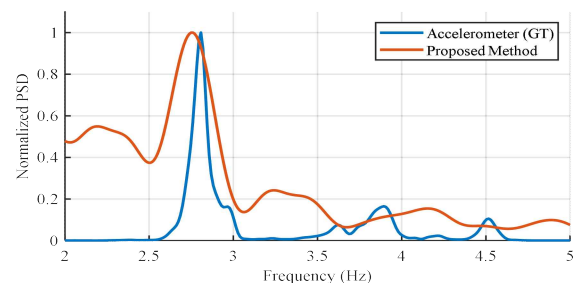


그림 4. 고유진동수 비교 결과

Fig. 4. Comparison of natural frequency results.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 dwell 모드 위성 SAR를 활용한 교량 고유진동수 추정 방안을 실증하였다. 분석 결과, 제안 기법은 교량의 지배적인 고유진동수에서 지상 계측치와 일치하는 결과를 얻었으며, 이는 접근이 제한된 대형 구조물의 비접촉식 원격 진단 도구로서 SAR의 활용 가치를 시사한다.

#### References

- [1] H. N. Li, L. Ren, Z. G. Jia, T. H. Yi, and D. S. Li, "State-of-the-art in structural health monitoring of large and complex civil infrastructures," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 6, no. 1, pp. 3-16, Apr. 2016.
- [2] M. Pozzi, A. Der Kiureghian, "Assessing the value of information for long-term structural health monitoring," *Proceedings of SPIE*, vol. 7984, p. 79842W, Apr. 2011.
- [3] C. Suppi, A. Lotti, A. Vattulainen, S. Diaz Riofrio, F. Rollo, and C. Ilioudis, et al., "Vibrational monitoring of isolated targets using single-pass SAR images," in *Proceedings of Structural Health Monitoring 2025*, Stanford, CA, Sep. 2025.
- [4] A. B. Vattulainen, F. Rollo, A. Lotti, D. Tonelli, S. D. Riofrio, and E. Tubaldi, "Bridge vibration measurements from very high-resolution spaceborne SAR," in *Proceedings of IEEE SENSORS*, Kobe, Oct. 2024.
- [5] F. Rollo, C. Ilioudis, and C. Clemente, "Advances in micro-Doppler processing in synthetic aperture radar: A review of techniques, results, and future trends," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 243-265, Dec. 2025.
- [6] ICEYE, "Imaging modes: Dwell modes," 2023. Available: <https://www.iceye.com/sar-data/imaging-modes/dwell>
- [7] ICEYE, "ICEYE introduces first-in-market satellite radar dwell capability," 2023. Available: <https://www.iceye.com/newsroom/press-releases/dwell-mode>

유 용 선 [한국항공대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0005-3834-8111>



2025년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학사)  
 2025년 3월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 석사과정  
 [주 관심분야] SAR 신호처리, 레이더 신호처리

채 수 빈 [한국항공대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0003-5824-8076>



2026년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학사)  
 2026년 3월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 석사과정  
 [주 관심분야] SAR 신호처리, 레이더 신호처리

임 태 정 [한국건설기술연구원/박사후연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2390-9247>



2017년 2월: 동아대학교 토목공학과 (공학사)

2024년 2월: 동아대학교 토목공학과 석·박사통합과정 (공학박사)

2024년 3월~2025년 5월: 동아대학교 박사후연구원

2025년 6월~현재: 한국건설기술연구원 구

조연구본부 박사후연구원

[주 관심분야] 구조물 건전성 감시, 구조물 동특성 분석

이 우 경 [한국항공대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-2092-2048>



1994년 2월: 한국과학기술원 전자 및 전자공학과 (공학사)

1996년 2월: 한국과학기술원 전자 및 전자공학과 (공학석사)

1999년 12월: 런던대학교(UCL) 전기전자공학과 (공학박사)

1999년 10월~2002년 12월: 한국과학기술원

원 인공위성센터 연구교수

2003년 1월~2004년 8월: 삼성종합기술원 책임연구원

2004년 9월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 교수

[주 관심분야] 위성탐체, SAR 영상, 레이더 시스템 및 신호처리