

## 탄성파 간섭법 탐사를 이용한 건축물 손상 평가 및 모니터링

정인석<sup>1</sup> · 조아현<sup>1</sup> · 남명진<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>세종대학교 에너지자원공학과

<sup>2</sup>세종대학교 지구자원시스템공학과

### Assessment and Monitoring of Structural Damage Using Seismic Wave Interferometry

In Seok Joung<sup>1</sup>, AHyun Cho<sup>1</sup>, and Myung Jin Nam<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Energy & Mineral Resources Engineering, Sejong University

<sup>2</sup>Department of Energy Resources and Geosystems Engineering, Sejong University

#### 요약

최근 탄성파를 기반으로 건축물 안전진단(structure health monitoring, SHM)을 수행하는 방법들에 대한 연구들이 많이 수행되고 있다. 특히 지구물리 탐사에서 주로 적용되어 오던 배경 잡음을 이용하는 탄성파 간섭법(seismic interferometry)이 SHM에 많이 적용되고 있다. 탄성파가 건축물 내부로 전파하며 발생하는 건축물의 반응을 분석하여 건축물의 강성 변화를 추정할 수 있을 뿐만 아니라, 건축물의 손상 여부와 그 위치도 평가할 수 있다. SHM에 적용되는 탄성파 간섭법에 대해 분석한 뒤 실제 적용 사례들도 분석한 결과, 탄성파 간섭법은 건축물의 안정성 평가나 모니터링 등에 적용할 수 있는 건축물 손상 탐지 평가 방법으로써 매우 효과적으로 활용할 수 있다고 판단된다.

**주요어:** 탄성파, 건축물안전진단, 충격함수반응, 파속, 시간지연

#### ABSTRACT

Recent research is increasingly focused on utilizing seismic waves for structure health monitoring (SHM). Specifically, seismic interferometry, a technique applied in geophysical surveys using ambient noise, is widely applied in SHM. This method involves analyzing the response of buildings to propagating seismic waves. This enables the estimation of changes in structural stiffness and the evaluation of the location and presence of damage. Analysis of seismic interferometry applied to SHM, along with case studies, indicates its highly effective application for assessing structural stability and monitoring building conditions. Seismic interferometry is thus recognized as an efficient approach for evaluating building integrity and damage detection in SHM and monitoring applications.

**KEYWORDS:** Seismic, Structure health monitoring, Impulse response function, wave velocity, time delay

#### 서론

건축물 안전진단(structure health monitoring; SHM) 기술은 건축물을 보수하는 데 소요되는 사회경제적 비용을 줄이고 사고를 방지할 수 있다. 특히, 최근에는 컴퓨터 기술과 센서 기술의 발전으로 건축물을 수치적으로 모사하여 현재 상태나 향후 추가적인 하중이 가해질 때의 안정성을 평가할 수 있게 되었다(Uzun, 2018). 낡은 토목 시설, 해양 건축물, 고층 건물, 교량, 원자력 발전소, 항공 우주 건축물 등 거대한 건축물들이 계속 건설되고 있는 현실을 감안하면 안전진단 기술은 앞으로도 지속적인 발전이 필요하다(Uzun, 2018; Kim *et al.*, 2018).

건축물의 안전을 보장하기 위해, 전통적인 내진설계와 보강 방법 외에도, 최근에는 4차 산업 혁명과 관련된 센서, 데이터 통신망 등의 정보처리 기술을 활용한 예측 시스템이 관심을 얻고 있다(Jang and Jeong, 2020). 한국에서는 지진 재해대책법을 근거로, 지진으로 인한 피해를 줄이기 위한 연구와 기술 개발이 이루어지고 있으며, 공공시설물에는 가속도 계측기를 설치하고 있다(Moon, 2018). 2010년 9월

#### \*Corresponding author

E-mail: nmj1203@gmail.com, nmj1203@sejong.ac.kr

Address: 209, Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, Korea

Received: 29 April 2024; Revised: 20 May 2024; Accepted: 27 May 2024

©2024, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

소방방재청에서는 이러한 계측 시스템을 위한 설치 및 운영기준을 제정하여, 각 시설물에서 취득한 지진가속도 계측 자료를 활용하여 지반과 시설물에 대한 분석 지표를 도출할 수 있게 되었다(Moon, 2018).

건축물 손상을 파악하는 방법 중 핵심적이면서 기초적인 작업 중 하나는 육안으로 벽 표면의 균열이나 건축물의 기울어짐, 침하 등을 조사하는 방법이다. 하지만 손상이 의심되나 육안으로 보기에 기울어짐이나 침하가 크기 않고(Kim *et al.*, 2019), 구조체 내부의 열화 현상을 감지하는 데는 한계가 있다(Song, 2023). 이러한 어려움을 극복하기 위해서 뿐만 아니라 내부에서 균열이 발생해서 표면까지 성장하기 전에도 파악할 수 있는 비파괴 검사 기술이 중요하다. 비파괴 검사 중, 진동 기반의 안전진단 방법은 건축물의 동적 거동을 이용해 건축물 시스템의 현재 상태를 파악하는데 이때 진동은 배경 잡음이나 지진, 인공적인 송신원 등으로 발생할 수 있다. 손상 탐지를 위해 대표적으로 사용되는 동적 특성들로는 고유 진동수(natural frequencies) (Salawu, 1997), 모드형상(mode shape) (Sasmal and Ramanjaneyulu, 2009), 구조 감쇠(structural dampings) (Montalvão *et al.*, 2009), 모달 유연성(modal flexibility) (Toksoy and Aktan, 1994), 모드형상 곡선(curvatures) (Pandey *et al.*, 1991), 전단파 속도(Rahmani *et al.*, 2015), 구조 임피던스(Tseng and Wang, 2005) 그리고 모달 변형 에너지(modal strain energy) (Stubbs *et al.*, 1992)가 있다.

대부분의 동적 특성과 관련된 안전진단 연구는 모드 해석(mode analysis) 또는 고유진동수 해석과 같은 모달(modal) 특성을 이용했지만, 탄성파의 거동에 기반한 방법들이 적용되면서 지구물리탐사에서 이용되는 개념이 사용되기 시작했다(Uzun, 2018). 건축물의 진동 반응들이 탄성파가 표면에 도달한 후 건축물 내부로 전파하면서 발생하므로(Şafak, 1999), 건축물을 따라 전파되는 파를 분석하면 건축물의 강성 변화를 추정할 수 있고 이러한 강성의 변화는 건축물 모니터링의 주된 목표다.

건축물의 손상 지점을 파가 지날 때는 파의 전파 속도가 느려지게 되므로, 탄성파 간섭법을 통해 획득한 데이터를 확인하면 이를 파악하여 손상을 탐지할 수 있다(García-Macías and Ubertini, 2019). 이를 위해서 곱풀기를 활용한 탄성파 간섭법이 건축물에서의 파속을 계산하는 데 자주 사용되고 있으며 건축물의 각 지점에 설치된 수신기에서 측정된 탄성파 자료들에 곱풀기 간섭법을 적용하여 충격함수반응(impulse response function; IRF)파형을 획득한다(탄성파에서 일반적으로 IRF라 하므로 이후 IRF로 통일함). IRF는 파의 속도, 모드 진동수, 전단 강도 등 건축물의 구조적 매개변수를 확인하는 데 사용할 수 있으며 이를 분석해 건축물의 손상 여부와 위치 등을 평가한다(e.g., Snieder and Şafak, 2006; Nakata *et al.*, 2013; Nakata and Snieder, 2014; Mordret *et al.*, 2017; Uzun *et al.*, 2019; Jian *et al.*, 2020).

이 연구에서는 먼저 안전진단 분야에 적용한 탄성파 간섭법의 원리와 안전진단 방법을 소개하고, 간섭법을 이용해 손상을 탐지하는 자료 해석 방법을 분석하였다. 이후 현장 자료를 적용한 실제 탐사 사례들을 소개하고자 한다.

### 탄성파 간섭법 기본이론

탄성파 간섭법은 한 쌍의 수신기에서 측정된 신호를 이용하는 방법(Fig. 1)으로, 측정된 두 신호에 간섭법을 적용하게 되면 기준이 되는 수신기 위치에서 송신한 신호를 다른 수신기에서 측정된 신호, 즉 가상 송신원에 의한 신호를 얻을 수 있는데(Lobkis and Weaver, 2001; Wapenaar, 2004), 이를 분석함으로써 매질의 물성(탄성파 속도, 감쇠 계수 등) 정보를 얻는 방법이다. 두 수신 신호에서 송수신 신호를 얻기 위해서는, 가상 송신원으로부터 발생한 파동장은 추가적인 잡음이 없다는 가정 하에 매질의 그린함수(green function)를 나타낸다는 것에 기초하여, 교차 상관(cross-correlation), 곱풀기(deconvolution), 교차 일관성(cross-coherence) 방법 등을 이용하여 그린함수 혹은 IRF를 추출한다.

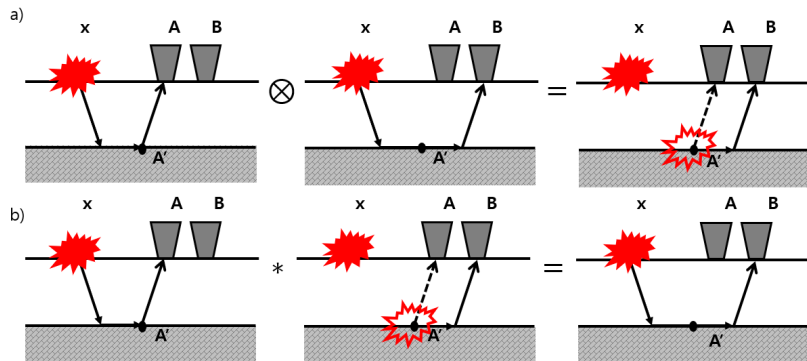


Fig. 1. Steps for creating 2D super virtual refraction arrivals: a) Correlation of the recorded trace at A with that at B for a source at x and b) virtual far-offset refraction arrivals b a combination of both a) correlation and convolution (solid rays are associated with positive travel times and dashed rays are negative travel times).

탄성파 간섭법에서 가장 대표적인 방법인 교차 상관을 이용하는 방법을 적용하기 위해서는 파가 전파할 때 에너지의 손실이 없다는 가정이 필요한데, 실제 매질에서 파가 전파할 때는 감쇠가 발생하므로 교차 상관을 이용한 데이터의 정확성이 떨어져 교차 상관 과정을 곱플기로 대체하기도 한다(Snieder, 2006; Wapenaar *et al.*, 2011). 곱플기를 적용한 방법은, 교차 상관을 이용할 때와 같이 두 개 이상의 수신기가 있어야 하지만 송신원의 스펙트럼 진폭의 변화를 수정함으로 교차 상관분석을 이용한 경우보다 더 큰 대역폭으로 파동을 추출할 수 있을 뿐만 아니라(Vasconcelos *et al.*, 2008), 경계 조건을 달리해 그린함수도 획득할 수 있다(e.g., Todorovska and Trifunac, 2008; Nakata and Snieder, 2014; Wen and Kalkan, 2017; García-Macías and Ubertini, 2019).

## 탄성파 간섭법을 이용한 건축물 안전진단

### 건축물 동적 특성 분석

어떤 시스템에서 입력과 출력 사이의 관계를 나타내는 함수를 전달함수(transfer function)라 한다. 건축물의 고유 진동수를 도출하기 위해서는, 건축물에서 취득한 자료의 전달함수를 활용할 수 있다. 건축물 내부를 전파하는 탄성파(입력)가 어떻게 측정될(출력)지를 예측할 수 있기 때문이다. 건축물에서의 전달함수를 얻기 위해서는 먼저, 건축물의 최하층과 최상층에서 측정된 신호에서 잡음을 제거한 후 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform; FFT)을 이용하여 시간 영역의 자료를 진동수 영역으로 변환한다. 변환한 최상층의 측정 자료는 최하층의 측정 자료로 나눔으로써 전달함수를 도출할 수 있게 되는데, 이때 전달함수에서 고유 진동수에 해당하는 마루(peak)점을 찾기 어려울 수 있으므로 3점 가중 평균 필터를 통해 평활화하여 마루점을 찾는다. 건축물의 고유 진동수는 건물 손상으로 변할 수 있어 모니터링이 필요하지만, 건축물의 모든 층에 가속도계를 설치하는 것은 어렵기 때문에 가속도계가 설치된 건축물 최상층의 상대 변위를 활용하여 층간 변위를 예측하는 방법을 사용한다(Joung *et al.*, 2022).

### 탄성파 간섭법을 이용한 특성 분석

안전진단에 탄성파 간섭법을 적용할 때에는, 먼저 건축물에서 다양한 원인에 의해 발생한 탄성파 신호들을 측정된 후 IRF를 얻은 뒤 (Fig. 2), 이를 기반으로 건축물의 매개변수(e.g., 전달파의 속도, 모드 진동수, 모양(shape) 및 고유 감쇠 등)를 확인하게 된다. 건축물은 높이( $z_{ref}$ )에서 고정된 경계 조건이 있어, 수신기에서 측정된 시계열 데이터에서 IRF를 다음과 같이 추출할 수 있다(Snieder *et al.*, 2009).

$$S(z, t) = F^{-1} \left( \frac{y(z, \omega) y^*(z_{ref}, \omega)}{|y^*(z_{ref}, \omega)|^2 + \epsilon} \right) \tag{1}$$

여기서  $S(z, t)$ 는 시간  $t$ , 건축물 높이  $z$ 에서 획득한 시계열 IRF,  $y(z, \omega)$ 는 높이  $z$ 에서 측정된 진동수 영역에서의 자료,  $|y^*(z_{ref}, \omega)|^2$ 는  $y_{ref}$ 의 파워 스펙트럼,  $\omega$ 는 각진동수,  $t$ 는 시간,  $z_{ref}$ 는 건물의 기준점 높이이다. 한편 \*는 복소켤레(complex conjugate)를 의미하며,  $\epsilon$ 는 안정화 매개변수(stabilizing parameter),  $F^{-1}$ 는 역푸리에 변환이다.  $\epsilon$ 는 일반적으로 기준 신호( $y(z_{ref}, t)$ ) 세기(power)의 백분위 값으로 설정하게 되는데, 이 값에 따라 IRF가 민감하게 변화한다.  $S(z, t)$ 는 기준 높이  $z_{ref}$ 에서 가상의 송신원에 대한 높이  $z$ 에서의 건축물 시스템의 반응을 물리적으로 표현한다.

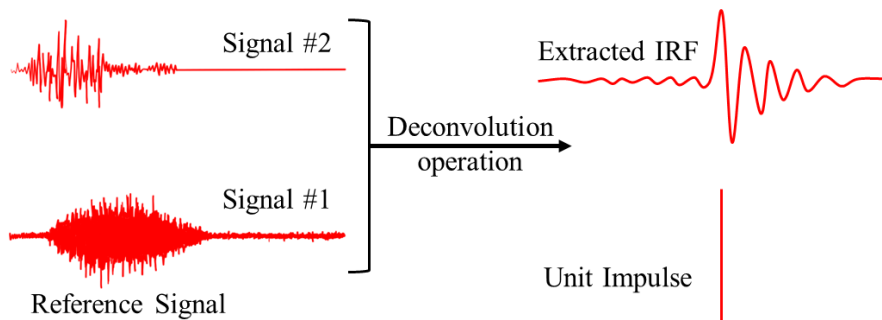


Fig. 2. Deconvolution operation between two signals, one being the reference yields the waveform that represents the response behavior of the receiver of the interest in each virtual unit impulse at the reference.

기준 높이에 대한 IRF를 알고 있을 때 시스템이 선형 영역에 있다면 곱말기 연산을 통해 입력에 대한 시스템의 반응을, 입력  $y(z_{ref}, t)$ 에 대해 각 층에서 다음과 같이 추정할 수 있다(Uzun *et al.*, 2019).

$$y(z, t) = y(z_{ref}, t) * S(z, t) = \int_0^t y(z_{ref}, \tau) S(z, t - \tau) d\tau \tag{2}$$

여기서 \*은 곱말기(convolution)를 나타내며,  $y(z, t)$ 는 높이  $z$ 에서 측정되는 반응 즉 출력값이며,  $z_{ref}$ 는 기준이 되는 높이,  $y(z_{ref}, t)$ 는  $z_{ref}$ 에서 측정된 신호이다. 이러한 함수는 입력과 출력 사이의 관계를 나타내며 선형 시불변 시스템(linear time invariable system)으로 모든 유형의 입력에 대해 선형성을 가지며, 매질이 손상되지 않은 한 시스템에서 추출한 IRF는 모두 동일하다(Fig. 3).

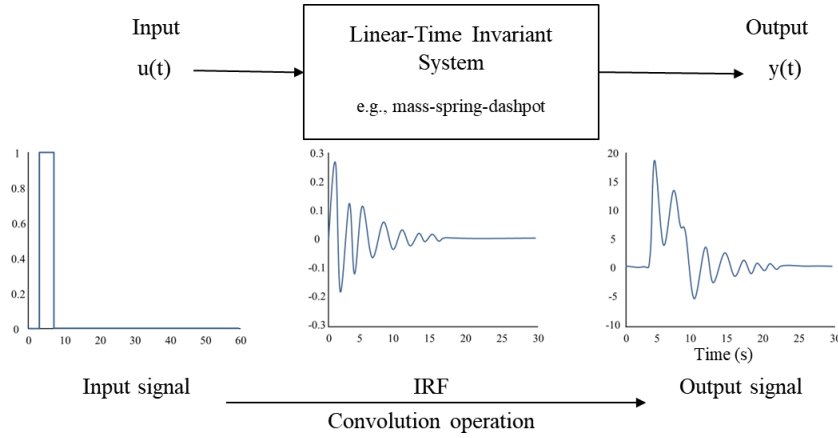


Fig. 3. Linear time invariable system.

건축물에서 전파하는 파의 이동 시간은 IRF로 계산할 수 있기 때문에(Fig. 4), IRF에서 시간 지연이 나타날 때 건축물에서 이동 시간이 더 걸린 것이고 이는 내부의 물성 변화에 의한 것이므로 손상을 유추할 수 있다. 즉, IRF에서 나타난 파의 마루 지점을 연결하였을 때 특정 구간에서 기울기가 달라지거나 모니터링의 경우 각 구간의 IRF를 비교하였을 때 마찬가지로 마루 지점이 나타나는 시간이 느려진다면 이를 손상으로 인한 시간지연으로 생각한다. 건축물 안전성 평가를 위한 수신기는 일반적으로 각 층마다 설치하게 되므로 간섭법 적용을 위

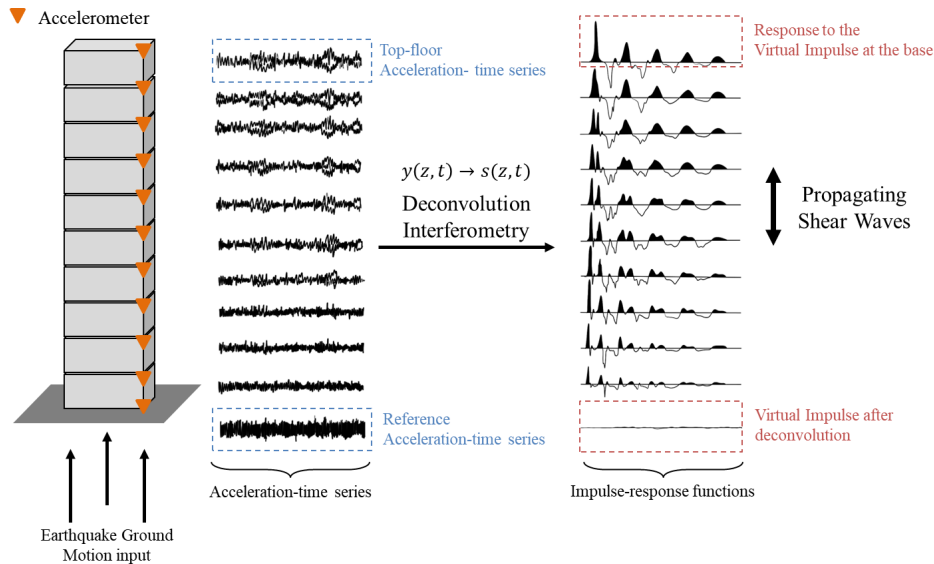


Fig. 4. Deconvolution seismic interferometry procedure that utilizes the earthquake shaking data for monitoring purposes. Each trace (left) is a wave received in each layer and the response to the virtual impulse at the base (right).

해서 기준 수신기를 설정한 뒤 기준 수신기에서 측정된 신호에 대해 파형을 획득하고자 하는 목표 수신기의 신호를 곱풀기하여 IRF를 획득한다. 기준 수신기는 실제로 파가 진입해 전파되기 시작하는 지표 높이(ground-level)의 수신기를 선택해 실제 탄성파의 데이터를 사용할 수도 있으며, 다른 높이의 수신기를 선택할 수도 있다. 하지만 대부분은 IRF가 가장 명확하게 비교되는 최상층의 높이를 선택해 탐사를 수행한다(e.g., Nakata *et al.*, 2013; Lacanna *et al.*, 2019).

지면의 수신기를 기준으로 할 때는, 구조 시스템에 대한 입력이 지면에 있으므로 양의 방향으로 전파되는 파형을 생성하게 되는데 이는 건물의 반응이 시간에 따른 원래의 송신원을 따른다는 것이기 때문이다. 그러므로, 실제 송신원이 발생한 지점이 아닌 곳(주로 최상층)의 송신 기준으로 하면 양과 음의 시간에 따라 전파되는 듯한 파형이 나타나며, 이때 음의 방향에서 나타나는 하강파(down-going wave)는 물리적으로 최상층에서 진동하기 전 건축물 시스템에 진입한 실제 상승파(up-going wave)로 볼 수 있다(Fig. 5).

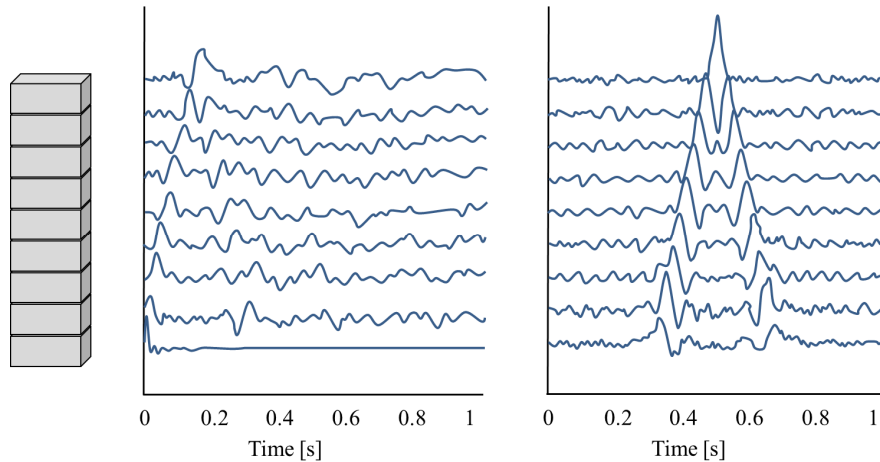


Fig. 5. Deconvolution can be computed with a virtual source at the roof level and a ground level source.

건축물의 변화(손상)를 탐지하기 위해 전단파의 속도를 계산할 때는, 초동 주시 발체를 사용하며 기준 송신원 위치에서 위쪽으로 이동하는 파의 첫 번째 마루에서 추출한 IRF에서 파의 속도를 추정한다. 파의 속도는 파의 이동거리와 파의 이동 시간을 통해 결정되므로, 주시 곡선에서 기울기는 건축물의 전단파 속도에 해당하며 마찬가지로 다른 높이의 수신기를 기준으로 사용할 때도 똑같이 적용할 수 있다. 간섭법을 이용한 건축물 안전성 평가는 각 지점에 설치한 센서들 취득한 데이터를 기반으로, 측정이 이루어지는 각 구간의 데이터를 비교하는 것이므로 건물 외벽에서 발생한 정확한 손상 위치를 찾아내기는 어렵다는 한계가 있지만(Rahmani *et al.*, 2015), 기존 비파괴 검사 방법들과 마찬가지로 외부에 직접적으로 손상이 나타나지 않고 건물의 안전성을 저하시키는 내부 손상과 성질, 상태를 신속하고 효율적으로 판단할 수 있다.

## 간섭법을 이용한 건축물 안전성 및 손상 평가 사례

최근 건축물 안정성 평가 및 손상 탐지의 분야에서도 적용되고 있는 탄성파 간섭법으로 안전진단을 수행할 경우 건축물의 일정 높이마다 수신기를 설치하고 측정된 탄성파 데이터들에서 IRF 파형을 획득해 전파 속도를 계산한다. IRF는 파의 속도, 모드 진동수, 전단 강도 등의 구조적 매개 변수를 식별할 수 있으므로 이를 분석해 건축물의 특정 위치에서의 변화를 탐지함으로써 손상 위치가 있는 건축물의 구간을 특정해낼 수 있다. 손상 위치 파악을 통해 또 다른 비파괴 탐사법과 같이 활용하거나 외관상의 손상을 확인해 빠르게 보수를 할 수 있다는 장점이 된다(e.g., Nakata and Snieder, 2014; Wen and Kalkan, 2017; Mordret *et al.*, 2017; Lopez-Caballero and Mercerat, 2018; Bulajić *et al.*, 2020). 여기서는 실제 건축물 안전진단과 모니터링과 관련된 연구 사례들을 소개하고자 한다.

### 건축물 안전진단

2002년 미국 Yorba Linda 지진 발생 당시 California의 Pasadena에 있는 Millikan Library 건물에서 측정된 데이터에 간섭법을 적용하여 각 층의 수신기 파형을 바탕으로 손상 위치를 추정했다(Snieder and Şafak, 2006; Ebrahimian *et al.*, 2014). Millikan Library 건물은 9개 층으로 이루어진 건물로 NS 방향의 거동에 대해 저항을 가지는 벽은 동쪽과 서쪽에 있으며 EW 방향 거동에 대한 저항은 엘리베이터

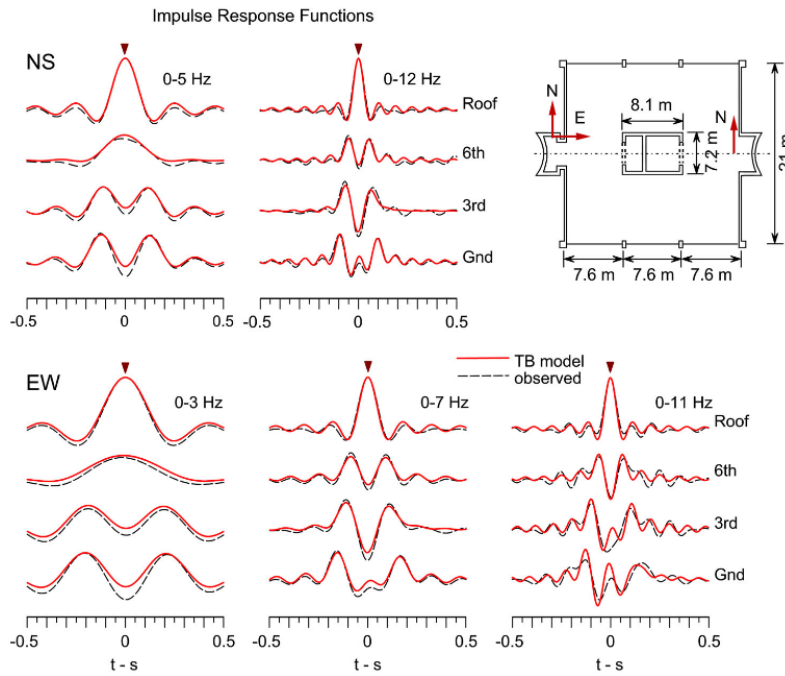


Fig. 6. Model and observed impulse response functions in different bands for the NS (top) and EW (bottom) responses (Ebrahimian *et al.*, 2014).

가 위치한 중앙 코어에 있다. 수신기는 지상층과 3, 6, 옥상의 벽과 중앙 코어에 설치되어 NS 방향과, EW 방향의 파형(Fig. 6)을 TB (Timoshenko Beam) 모델의 결과와 비교해 관측하였으며 건물 상부층에서 약화가 발생한 것으로 추정하였다(Ebrahimian *et al.*, 2014).

건물의 지진 발생 시와 평상시의 배경 잡음에서 계산한 IRF를 이용해 건축물의 손상을 평가하는 방법(Kohler *et al.*, 2007; Prieto *et al.*, 2010)에 기초하여, 미국 로스앤젤레스(Los Angeles, LA)의 Sherman Oaks 건물에서는 1971년 Fernando 지진 발생 시의 탄성파 데이터를 통해 파의 속도를 해석하여 외관상으로는 보이지 않는 건물의 2층 기둥에서 균열을 찾았다(Rahmani *et al.*, 2015). 수신기는 1층과 중간층, 꼭대기 층 3개를 설치하여 건물을 상단부와 하단부로 나누어 파의 속도를 해석(Fig. 7)하고 균열이 있는 건물 층이 속한 하단부에서 파의 속도 감소가 크다는 것을 파악해 균열을 찾아낼 수 있었다(Fig. 8).

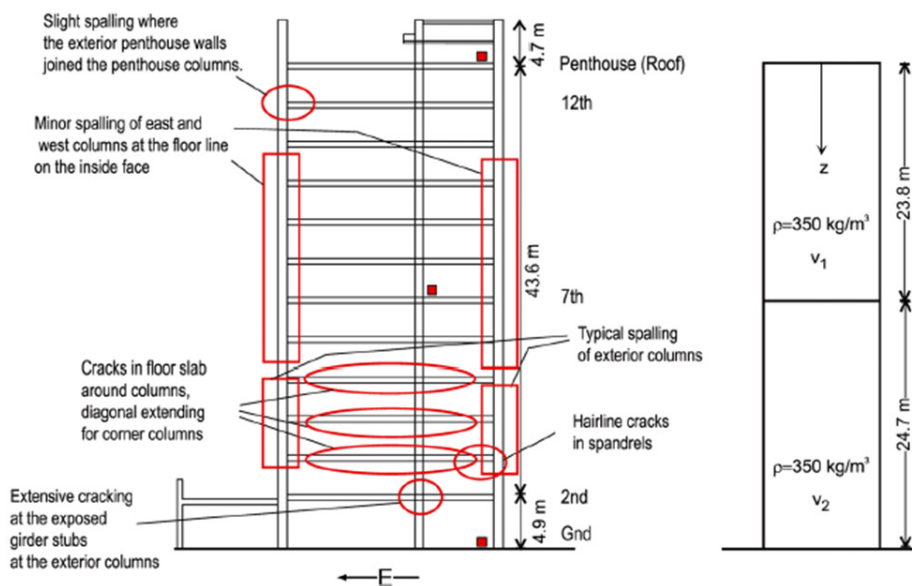


Fig. 7. Distribution of structural damage along the Sherman Oaks 12-story office building height during the San Fernando 1971 earthquake (left: drawn based on John Blume Associates). and the two-layer shear beam model to be fitted (right) (Rahmani *et al.*, 2015).

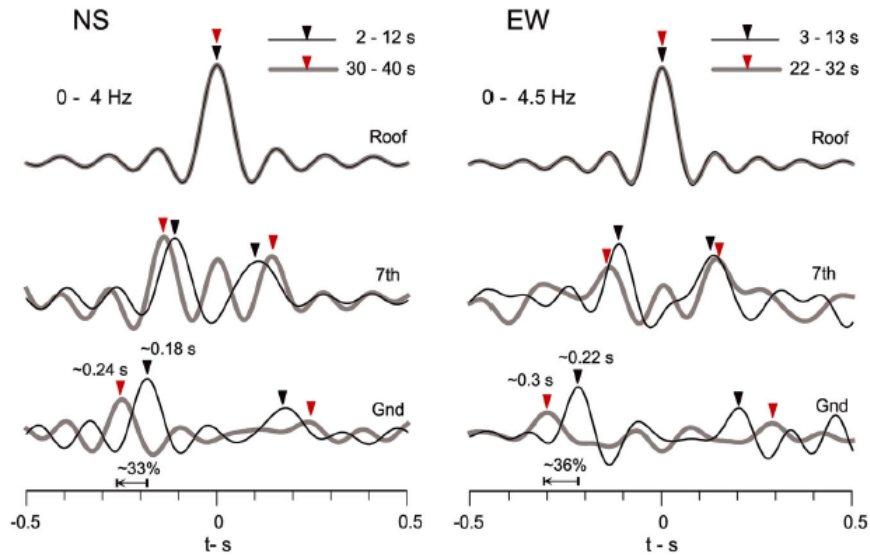


Fig. 8. Impulse response functions for two 10s time windows, one in the beginning of shaking (2–12s) and the other one near the end of shaking (22–32s). Changes in wave travel time vibration can be seen (Rahmani *et al.*, 2015).

한편 이탈리아 페루자(Perugia) 지구에서 석탑에 관한 탐사를 통해 석조 건물 모델을 계층화(layering)하여 손상을 정량화 하는 연구에서는(García-Macías and Ubertini, 2019) 실제 손상과 비교하기 위해 ABAQUS 6.10 플랫폼을 이용해 석탑의 비선형 3D수치 모델을 구조도면 및 문헌을 통해 구현하였다. 그 결과 측정된 데이터를 이용해 모델에서 추정된 각 높이에서의 강성 변화는 지진으로 인한 손상과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단하였으며 지진 시간을 통해 식별한 석탑의 손상 부분과 실제 손상 위치가 일치하였다. 즉, 강성 변화에 기초한 손상 영역은 충분히 정량화 할 수 있음을 확인하였다.

## 건물 모니터링

21층인 미국의 Green Building에서 2015년 5월 12일~5월 27일까지 15일 동안 측정된 배경 잡음 데이터에 탄성파 간섭법을 적용하여 건물의 IRF를 계산하여 파의 속도를 모니터링 하고 건물 동적 특성을 파악하였다(Sun *et al.*, 2017). 이후 동적 특성을 바탕으로 베이시안(Bayesian) 모델을 사용해 지진 발생 시의 손상 가능 여부를 예측할 수 있었는데, 이는 배경 잡음을 측정된 데이터를 통해서도 모니터링이 가능하며 손상 탐지 가능성과 이를 통해 지속적인 모니터링이 가능하다는 것을 보여준다.

북 마케도니아, Skopje의 12층 ZOIL 건물에서 1980년부터 2004년까지 25년간 11차례의 지진에서 측정된 자료를 이용하여 건물의 피해 가능성을 추정하였다(Bulajić *et al.*, 2020). 수신기는 지상층과 8층, 12층 총 3곳에 설치되었으며 각 수신기 사이를 하나의 층으로 보아 해당 건물을 총 2개 층을 가진 모델로 가정하고 NS와 EW 방향의 파형을 확인하는 방식을 사용하였다. 해석 결과 2002년 발생한 Gnjilane 지진으로 인해 영구적인 손상이 발생해 강성이 저하된 것을 확인하였으며 파의 속도 변화는 약 10%, 강성 변화는 약 19%인 것으로 분석했다. Gnjilane 지진 이후 건물의 손상은 관측되지 않았으며, 확인한 파속 변화는 구조용 콘크리트의 미세 균열 및 손상에 의한 것이었다.

그 외에도 미국 Imperial County Services 건물에서 지진 발생 당시 측정된 데이터에 간섭법을 적용하여 건물에서의 파속 변화를 통해 지진 발생 시간 동안의 손상 위치를 추정하였다(Todorovska and Trifunac, 2008). 각 층에서 최대 진폭 전과 후 그리고 최대 진폭 총 3개의 시간대에서 측정된 수평 성분과 탄성파 데이터 곱셈기 간섭법을 적용하여 얻은 IRF로 파의 속도를 측정한 뒤, 이 속도를 이용해 건물의 강성 감소로 발생하는 지진 시간을 분석하고 지진 발생 전 측정된 데이터를 기준 파형으로 사용하여 손상 발생 유무를 분석하였다. 데이터는 0.1~0.125 Hz와 25~27 Hz 대역 통과 필터를 적용하였고 지진 발생 후 건물은 심각하게 손상되어 육안으로도 그 부위를 파악할 수 있었다. 건물 전체의 강성은 최소 40%에서 최대 80%까지 감소하였으며, 지진 발생 시 1층에서 가장 큰 강성 감소가 발생하였다. 강성 변화는 건물의 상부에는 큰 균열이 발생하지 않았고 하부에서 대부분 발생하는 것을 보여주었으며 이는 외부에서 관측한 당시의 손상 기록과 일치했다.

## 결론

이 연구에서는 탄성파 간섭법에 대한 기본적인 원리와 건축물 안전진단 분야에 적용하는 방법을 정리하고 실제 건축물에서 안전진단을 수행한 사례들을 대해 분석하였다. 기술 발전과 함께 건축물 안전진단 기술의 중요성은 더욱 부각되고 있다. 최근에는 공공시설물이나 고층 건물 등에 센서를 설치하고 이 센서와 데이터망 등 정보처리 기술과 시스템을 활용하고 있다. 앞으로 건축물 안전성과 관련된 사회적·경제적 비용을 최소화하고 사고를 방지하기 위해 계측 시스템의 개발이 지속적으로 이루어질 것으로 판단된다. 센서에서 측정된 자료를 이용해 건물 손상을 평가하는 다양한 방법 중 탄성파 간섭법이 있다. 하지만 탄성파 간섭법을 이용해 건축물의 변화를 추정할 수 있지만, 건축물의 안전성을 평가하는 데 있어서 국부적인 단위까지 정밀하게 분석하는 데는 한계가 있는 상황이다. 그럼에도 탄성파 간섭법은 기존의 능동형, 수동형 탄성파 탐사에서 필요로 하는 공간적 혹은 비용적 한계 등으로 인한 문제 해결에도 도움을 줄 수 있으며, 건축물의 변화·손상을 신속하게 감지하고 특히 초고층 건물처럼 다른 안전진단 방법들로는 지속적인 손상 평가가 어려운 경우 보수가 필요할 수도 있는 특정 구간을 식별해내는 하나의 지표로서 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 논문은 2024년도 정부(원자력안전위원회)의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행된 연구사업입니다(RS-2021-KN066110).

## References

- Bulajić, B. Đ., Todorovska, M. I., Manić, M. I., and Trifunac, M. D., 2020, Structural health monitoring study of the ZOIL building using earthquake records, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **133**, 106105. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106105>
- Ebrahimian, M., Rahmani, M., and Todorovska, M. I., 2014, Nonparametric estimation of wave dispersion in high-rise buildings by seismic interferometry, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **43(15)**, 2361-2375. <https://doi.org/10.1002/eqe.2453>
- García-Macías, E., and Ubertini, F., 2019, Seismic interferometry for earthquake-induced damage identification in historic masonry towers, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **132**, 380-404. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.06.037>
- Jang, W. S., and Jeong, S. H., 2020, A study on the validation of measured data from the seismic accelerometers in the safety evaluation system of public buildings, *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **24(5)**, 150-157 (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.11112/jksmi.2020.24.5.150>
- Jian, J., Snieder, R., and Nakata, N., 2020, Extracting the response of the bay bridge, california, from the application of multichannel deconvolution to earthquake-induced shaking, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **110(2)**, 556-564. <https://doi.org/10.1785/0120190231>
- Joung, I. S., Cho, A., Jang, H., Kim, B., Cho, C. S., and Nam, M. J., 2022, Seismic interferometry: research trends and technological introduction, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, **59(2)**, 205-217 (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.32390/ksmer.2022.59.2.205>
- Kim, H. U., Lee, J. W., and Kim, M. J., 2019, Latest techniques for monitoring the condition of underground structures for disaster response, *Magazine of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, **21(1)**, 55-66.
- Kim, M. K., Oh, T. M., Kim, H., and Lee, J. W., 2018, Determination of elastic velocity of plate-like specimen for estimation of structural damage location, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, **18(6)**, 249-258 (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.6.249>
- Kohler, M. D., Heaton, T. H., and Bradford, S. C., 2007, Propagating waves in the steel, moment-frame factor building recorded during earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97(4)**, 1334-1345. <http://dx.doi.org/10.1785/0120060148>
- Lacanna, G., Ripepe, M., Coli, M., Genco, R., and Marchetti, E., 2019, Full structural dynamic response from ambient vibration of Giotto's bell tower in Firenze (Italy), using modal analysis and seismic interferometry, *NDT & E International*, **102**, 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.11.002>
- Lobkis, O. I., and Weaver, R. L., 2001, On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **110(6)**, 3011-3017. <https://doi.org/10.1121/1.1417528>
- Lopez-Caballero, F., and Mercerat, E. D., 2018, Damage evaluation of RC building with soil-structure interaction by seismic interferometry: A numerical case study, *In 16th European Earthquake Engineering Conference, Thessaloniki, Greece*.



- Montalvão, D., Ribeiro, A. M. R., and Duarte-Silva, J., 2009, A method for the localization of damage in a CFRP plate using damping, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **23(6)**, 1846-1854. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2008.08.011>
- Moon, K. H., 2018, Application and case study of structure health monitoring systems for building, *Review of Architecture and Building Science*, **62(11)**, 31-34. <http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2015.19.3.010>
- Mordret, A., Sun, H., Prieto, G. A., Toksöz, M. N., and Büyüköztürk, O., 2017, Continuous monitoring of high-rise buildings using seismic interferometry, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **107(6)**, 2759-2773. <https://doi.org/10.1785/0120160282>
- Nakata, N., and Snieder, R., 2014, Monitoring a building using deconvolution interferometry. ii: ambient-vibration analysis monitoring a building using deconvolution interferometry. II: Ambient-vibration analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **104(1)**, 204-213. <https://doi.org/10.1785/0120130050>
- Nakata, N., Snieder, R., Kuroda, S., Ito, S., Aizawa, T., and Kunimi, T., 2013, Monitoring a building using deconvolution interferometry. I: Earthquake-data analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **103(3)**, 1662-1678. <https://doi.org/10.1785/0120120291>
- Pandey, A. K., Biswas, M., and Samman, M. M., 1991, Damage detection from changes in curvature mode shapes, *Journal of Sound and Vibration*, **145(2)**, 321-332. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90595-B](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90595-B)
- Prieto, G. A., Lawrence, J. F., Chung, A. I., and Kohler, M. D., 2010, Impulse response of civil structures from ambient noise analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100(5A)**, 2322-2328. <https://doi.org/10.1785/0120090285>
- Rahmani, M., Ebrahimian, M., and Todorovska, M. I., 2015, Time-wave velocity analysis for early earthquake damage detection in buildings: Application to a damaged full-scale RC building, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **44(4)**, 619-636. <https://doi.org/10.1002/eqe.2539>
- Şafak, E., 1999, Wave-propagation formulation of seismic response of multistory buildings, *Journal of Structural Engineering*, **125(4)**, 426-437. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1999\)125:4\(426\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:4(426))
- Salawu, O. S., 1997, Detection of structural damage through changes in frequency: a review, *Engineering Structures*, **19(9)**, 718-723. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(96\)00149-6](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(96)00149-6)
- Sasmal, S., and Ramanjaneyulu, K., 2009, Detection and quantification of structural damage of a beam-like structure using natural frequencies, *Engineering*, **1(3)**, 167-176. <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2009.13020>
- Snieder, R., 2006, The theory of coda wave interferometry, *Pure and Applied Geophysics*, **163**, 455-473. <https://doi.org/10.1007/s00024-005-0026-6>
- Snieder, R., and Şafak, E., 2006, Extracting the building response using seismic interferometry: Theory and application to the Millikan Library in Pasadena, California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96(2)**, 586-598. <https://doi.org/10.1785/0120050109>
- Snieder, R., Miyazawa, M., Slob, E., Vasconcelos, I., and Wapenaar, K., 2009, A comparison of strategies for seismic interferometry, *Surveys in Geophysics*, **30**, 503-523. <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-009-9069-z>
- Song, H. M., 2023, Ultrasonic imaging technology for nondestructive condition assessment of concrete structures, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, **35(5)**, 68-72.
- Stubbs, N., Kim, J. T., and Topole, K., 1992, An efficient and robust algorithm for damage localization in offshore platforms, *In Proceedings of the ASCE 10th structures congress*, **1**, 543-546. <http://dx.doi.org/10.2307/3716590>
- Sun, H., Mordret, A., Prieto, G. A., Toksoz, M. N., and Buyukozturk, O., 2017, Bayesian characterization of buildings using seismic interferometry on ambient vibrations, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **85**, 468-486. <http://dx.doi.org/10.1785/0120160282>
- Todorovska, M. I., and Trifunac, M. D., 2008, Earthquake damage detection in the Imperial County Services Building III: analysis of wave travel times via impulse response functions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **28(5)**, 387-404. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.07.001>
- Toksoy, T., and Aktan, A. E., 1994, Bridge-condition assessment by modal flexibility, *Experimental Mechanics*, **34**, 271-278. <https://doi.org/10.1007/BF02319765>
- Tseng, K. K., and Wang, L., 2005, Impedance-based method for nondestructive damage identification, *Journal of Engineering Mechanics*, **131(1)**, 58-64. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2005\)131:1\(58\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2005)131:1(58))
- Uzun, M., 2018, *Learning Structures: Fusing Deconvolution-Based Seismic Interferometry with Bayesian Inference for Structural Health Assessment*, Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology. <http://hdl.handle.net/1721.1/115801>
- Uzun, M., Sun, H., Smit, D., and Büyüköztürk, O., 2019, Structural damage detection using Bayesian inference and seismic interferometry, *Structural Control and Health Monitoring*, **26(11)**, e2445. <https://doi.org/10.1002/stc.2445>
- Vasconcelos, I., 2008, Generalized representations of perturbed fields-Applications in seismic interferometry and migration, *In SEG International Exposition and Annual Meeting, SEG-2008*.
- Wapenaar, K., 2004, Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation, *Physical Review*

*Letters*, **93(25)**, 254-301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.254301>

Wapenaar, K., van der Neut, J., Ruigrok, E., Draganov, D., Hunziker, J., Slob, E., Thorbecke, J., and Snieder, R., 2011, Seismic interferometry by crosscorrelation and by multidimensional deconvolution: A systematic comparison, *Geophysical Journal International*, **185(3)**, 1335-1364. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05007.x>

Wen, W., and Kalkan, E., 2017, System identification based on deconvolution and cross correlation: An application to a 20-story instrumented building in Anchorage, Alaska, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **107(2)**, 718-740. <https://doi.org/10.1785/0120160069>



**정 인 석**

2020년 세종대학교 공과대학 에너지자원공학과 공학사  
현재 세종대학교 에너지자원공학과 석박사통합과정  
E-mail: bead709@naver.com



**조 아 현**

2019년 세종대학교 공과대학 에너지자원공학과 공학사  
현재 세종대학교 에너지자원공학과 석박사통합과정  
E-mail: ahyunc1223@gmail.com



**남 명 진**

1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
2001년 서울대학교 공과대학 대학원 지구환경시스템  
공학부 공학석사  
2006년 서울대학교 공과대학 대학원 지구환경시스템  
공학부 공학박사  
2006년~2007년 한국지질자원연구원 박사 후 연수  
2007년~2009년 Postdoctoral Fellow,  
The University of Texas at Austin  
2009년~2010년 한국지질자원연구원 (기한부)선임연구원  
2010년 세종대학교 전임강사  
2010년~2014년 세종대학교 조교수  
현재 세종대학교 에너지자원공학과/지구자원시스템공학과 교수  
e-mail: nmj1203@gmail.com, nmj1203@sejong.ac.kr