과학기술정보통신부

보도자료

대체불가 대한민국

2026. 11. 27.(금) 04:00 (국제 엠바고)

보도시점 배포 2026. 11. 24.(화) 09:00 (2026. 11. 27.(금) 조간)

땅속 광섬유로 '작은 지진'의 파열 순간을 1000분의 1초 단위로 포착

– 0.042초 간격 두 차례로 나뉜 '조각난 파열', 작은 지진의 복잡한 발생 과정 규명

– 서울대 김영희 교수 연구팀, 사이언스(Science)誌 게재… 대도시 지진 모니터링 새 지평

땅속 통신용 광섬유를 수천 개의 지진계처럼 활용해, 실험실 암석 실험과 대형 지진 관측 사이에 공백으로 남아 있던 **'작은 지진의 파열 과정'을 1000분의 1초 단위로 들여다볼 수 있는 길**이 열렸다.

과학기술정보통신부(부총리 겸 과학기술정보통신부 장관 배경훈, 이하 '과기정통부')는 **서울대학교 김영희 교수 연구팀**이 **통신용 광섬유에 분산음향센싱(DAS)* 기술을 적용**해 규모 2 지진의 파열 과정을 1000분의 1초 단위로 영상화하고, **이 지진이 서로 맞닿아 있지만 분리된 두 단계 파열로 진행**됐음을 규명했다고 밝혔다.

* 분산음향센싱(DAS): 광섬유에 레이저 빛을 쏘아 되돌아오는 빛의 변화로 광섬유가 미세하게 늘어나고 줄어드는 정도를 측정하는 기술

과기정통부의 **'기초연구사업(선도연구센터, 중견연구)'** 지원으로 수행한 이번 연구 성과는 세계 최고 권위의 국제학술지 **「사이언스(Science)」誌에 11월 27일(금) 새벽 4시(현지 시각 11.26.(목) 14시, EDT) 게재***됐다.

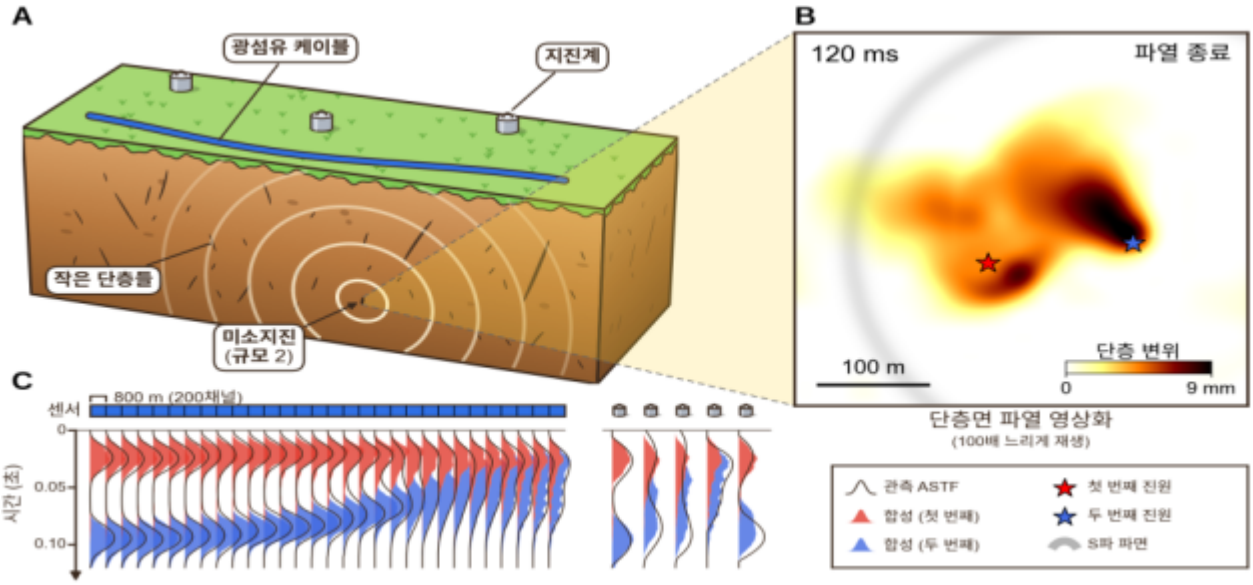
* 논문명 : Millisecond-scale imaging of fragmented earthquake rupture by near-source fiber-optic sensing

규모 3 미만의 작은 지진은 가장 흔하게 관측되는 지진이지만, 지진파가 약하고 파열이 금세 끝나 **땅속 단층이 어떻게 깨지는지는 거의 들여다보지 못한 채** '동그란 균열'이 한 번에 퍼지는 단순한 모습으로 가정돼 왔다. **작은 지진이 큰 지진을 그대로 축소한 것**인지, 아니면 **다른 방식으로 깨지는 지**는 **오랜 과학적 난제**로 남아 있었다.

연구팀은 이를 해결하기 위해 미국 캘리포니아 남부 브롤리 지진대를 가로지르는 **약 28㎞ 길이의 통신용 광섬유에 분산음향센싱(DAS) 기술을 적용**했다. 광섬유를 따라 4m 간격으로 배치된 약 7,000개 지점에서 **땅의 미세한 변형을 연속적으로 기록**하며, **광섬유 한 가닥을 초고밀도 지진 관측망처럼 활용**한 것이다. 연구팀은 **2021년 5월 광섬유 인근에서 발생한 규모 2 지진의 단층 파열* 과정을 정밀 복원**하는 데 성공했다.

* 단층 파열: 땅속 단층면을 따라 암석이 갑자기 미끄러지며 깨지는 현상, 파열이 퍼져 나가면서 지진파가 발생

분석 결과, 해당 지진은 하나의 파열이 연속적으로 퍼진 것이 아니라 서로 **맞닿아 있으면서도 겹치지 않는 두 영역에서 차례로 일어난 두 단계 파열**이었다. 두번째 파열은 첫번째 파열이 시작된 지 약 0.042초 뒤 바로 옆 단층 영역에서 새롭게 시작됐다. 나아가 당시 약 3시간 동안 발생한 16개의 작은 지진 역시 약 500m 범위 안에서 서로 겹치지 않는 영역을 나눠 깨뜨렸다.



이러한 '조각난 파열'은 2012년에 잇따라 일어난 규모 5.3과 5.4 지진에서도 보고된 바 있어, **방출 에너지가 수만 배 차이 나는 지진들이 비슷한 물리적 방식으로 깨질 수 있음을 시사**한다.

이번 연구는 흔히 일어나는 **작은 지진이 땅속 단층이 깨지고 멈추는 원리**를 생생하게 보여 주는 **'자연 속 실험실' 역할**을 할 수 있음을 나타낸다. 실험실 암석 실험은 자연 단층의 복잡함을 재현하기 어렵고, 대형 지진은 발생 빈도가

낮아 관측에 한계가 있었으나, 이번 성과가 두 영역 사이의 관측 공백을 메운 것이다. 또한, **이미 매설된 통신용 광섬유에 분산음향센싱 기술을 적용하면 대도시에서도 지진 위험 분석과 대응 기술을 고도화**할 수 있을 것으로 기대된다.

김영희 교수는 "**흔한 규모 2 지진 하나에도 파열이 멈추고 다시 시작되는 복잡한 과정이 숨어 있었다**"며 "통신용 광섬유를 활용하면 작은 지진을 단층의 작동 원리를 들여다보는 새로운 창으로 쓸 수 있고, 앞으로 지역에 따라 파열 방식이 어떻게 달라지는지 체계적으로 비교하는 연구로 넓혀 갈 수 있을 것"이라고 밝혔다.

과기정통부 김성수 연구개발정책실장은 "이번 성과는 **작은 지진이 일어날 때 땅속 단층은 어떻게 움직일까 하는 연구자의 궁금증**에서 시작했다"며 "앞으로도 연구자가 스스로 던진 질문에 답을 찾아갈 수 있도록 **기초연구에 대한 지원을 아끼지 않을 것**"이라고 밝혔다.

담당 부서	과학기술정보통신부 기초연구진흥과	책임자	과장	박시정	(044-202-4530)
		담당자	주무관	서동근	(044-202-4537)
연구 기관	서울대학교 지구환경과학부	교신저자	교수	김영희	(02-880-6735)

대체불가 대한민국
내일을 만드는 과학기술 내삶을 채우는 디지털·AI
대한민국 정책브리핑
OPEN 출처표시 공공누리 공공저작물 자유이용허락
OPEN 변경금지 공공누리 공공저작물 자유이용허락

주요내용 설명

<작성 : 서울대학교 한상우 박사>

논문명	Millisecond-scale imaging of fragmented earthquake rupture by near-source fiber-optic sensing
저널명	Science
키워드	microearthquake rupture(미소지진 파열), distributed acoustic sensing(분산음향센싱), rupture complexity(파열 복잡성), earthquake swarm(군발지진), Brawley seismic zone(브롤리 지진대)
DOI	10.1126/science.aei0507 (게재예정)
저 자	한상우 박사(제1저자/서울대학교), 김영희 교수(교신저자/서울대학교), 조나단 아호-프랭클린(Jonathan Ajo-Franklin) 교수(교신저자/미국 라이스대학교·로렌스버클리국립연구소), 김재우(미국 라이스대학교), 아비나시 나야크(Avinash Nayak) 박사(미국 로렌스버클리국립연구소), 푸 인(Fu Yin)(미국 라이스대학교)

1. 연구의 필요성

○ 지진의 크기와 양상은 단층 파열이 어디에서 시작해 어떤 경로로 커지고 어디에서 멈추는지에 따라 달라진다. 규모 5 이상의 큰 지진에서는 정밀한 파열 분석으로 단층의 여러 구간이 차례로 깨지며 파열이 끊기고 이어지는 복잡한 과정이 확인돼 왔다.

○ 반면 규모 3 미만의 작은 지진(미소지진)은 가장 흔하게 관측되지만 신호가 약하고 파열이 순식간에 끝나(규모 2 지진은 약 0.1초), 흔히 한 점이나 '동그란 균열'로 단순화해 해석해 왔다. 작은 지진부터 큰 지진까지 같은 원리로 일어난다는 '자기유사성' 규모 법칙도 이 단순화 위에 세워져 있어, 큰 지진의 복잡한 파열이 작은 지진에서도 일어나는지는 중요한 질문으로 남아 있었다.

○ 분산음향센싱(DAS)은 통신용 광섬유를 수 m 간격의 센서 수천 개로 바꿔 기존 관측망보다 훨씬 촘촘한 관측을 가능하게 한다. 연구팀은 이를 지진 발생 지점 가까이에서 활용해 작은 지진의 파열 과정을 밀리초 단위로 분해해 관측했다.

2. 연구내용

○ 미국 캘리포니아 남부 브롤리 지진대를 가로지르는 28 km 길이의 통신용 광섬유(약 7,000개 지점, 4 m 간격)와 인근 지진관측소 자료로, 2021년 5월 광섬유 바로 근처에서 일어난 규모 2 지진을 분석했다. 같은 자리에서 일어난 규모 1.2 지진을 기준 신호로 삼아 지진파가 지나온 경로의 영향을 지우고, 단층면 위 미끄러짐을 시간에 따라 역산해 파열 과정을 복원했다.

○ 그 결과 규모 2 지진은 하나의 연속 파열이 아니라 두 단계로 일어났다. 두 번째 파열은 첫 파열이 시작된 지 약 42밀리초 뒤 남서쪽 이웃 영역에서 새로 시작됐고, 두 파열 영역은 맞닿아 있지만 겹치지 않았다(그림1).

○ 두 파열 사이에는 응력이 낮은 구간이 있어 첫 파열은 이를 넘지 못했다. 대신 첫 파열의 S파가 만든 순간적인 응력 변화가 약 40밀리초에 두 번째 파열 지점에서 최고점에 이르렀다. 이는 두 번째 파열의 시작과 맞물려, 첫 파열의 지진파가 이웃 영역의 파열을 일으킨 동적 촉발로 해석된다(그림1).

○ 약 3시간 동안 같은 단층면에서 일어난 16개 지진(규모 2 지진 포함)도 지름 약 500 m 범위를 서로 거의 겹치지 않게 나눠 깨뜨렸다(그림2). 이런 조각난 파열은 파열이 크게 자라지 못하게 해, 뚜렷한 본진 없이 지진이 무리 지어 일어나는 이 지역의 특징과 부합한다. 약 7 km 북쪽의 2012년 규모 5.3·5.4 지진에서도 비슷한 양상이 보고됐다.

3. 연구성과/기대효과

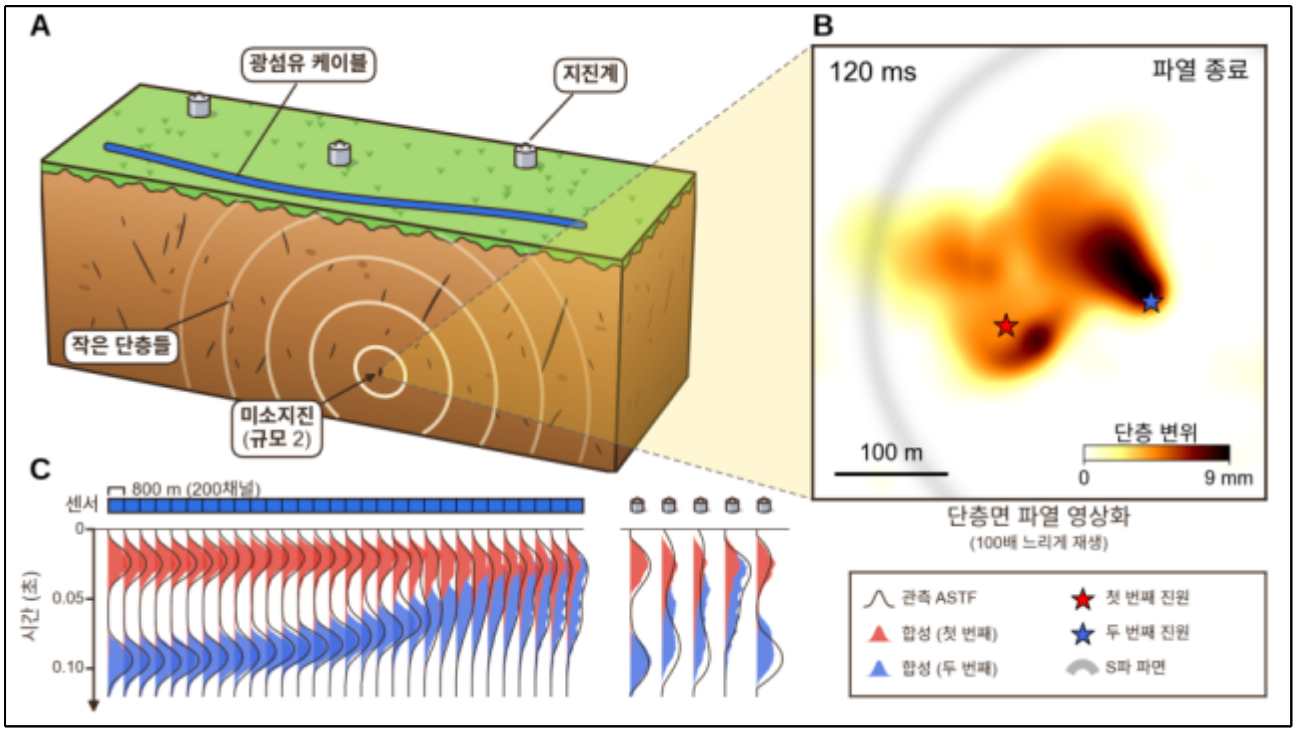
○ 이번 연구는 통신용 광섬유로 규모 2 지진의 파열을 미터·밀리초 단위로 복원해, 작은 지진도 파열이 멈추고 다시 시작되는 두 단계 파열로 일어날 수 있으며 이런 조각난 파열이 지진 하나에서 지진

무리까지 일관되게 나타남을 보였다.

○ 가장 흔한 작은 지진을 ‘자연 실험실’로 삼으면 실험실 암석 실험과 드물게 일어나는 큰 지진 분석 사이의 관측 공백을 메우고, 지진이 어디까지 커질 수 있는지를 좌우하는 조건을 이해하는 실마리를 얻을 수 있다.

○ 이미 깔린 통신용 광섬유를 활용하면 단층 주변과 대도시에서도 촘촘한 관측망을 만들 수 있어, 기존 지진관측망을 보완하고 지진 위험 분석·대응 기술을 고도화하는 데 활용될 수 있다.

그림 설명



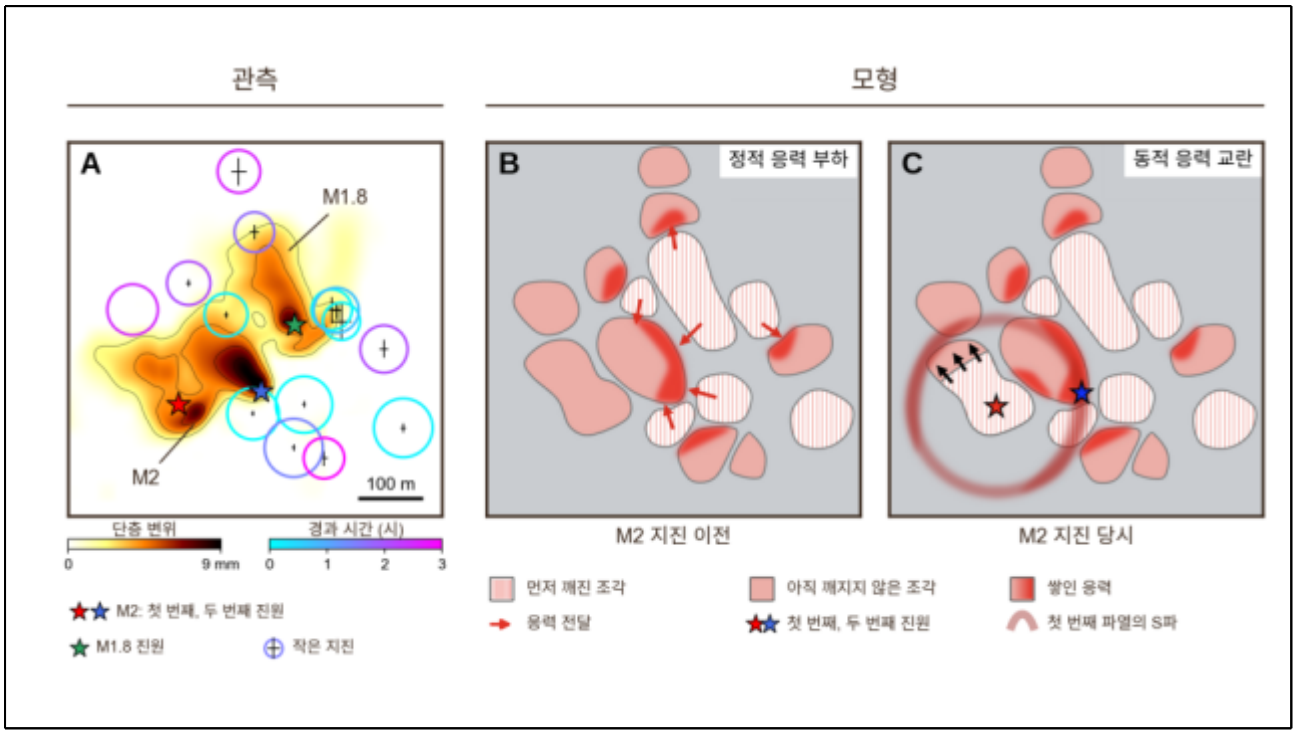
(그림1) 광섬유와 지진계로 복원한 규모 2 지진의 두 단계 파열

(A) 광섬유 케이블과 지진계로 땅속 작은 지진(규모 2)을 관측하는 모식도.

(B) 관측 자료로 복원한 단층면 파열(파열이 끝난 0.12초). 색은 단층 변위, 빨간·파란 별은 두 파열의 시작점이며, 두 번째 파열은 첫 파열의 S파가 닿은 직후(약 0.042초) 시작됐다.

(C) 광섬유(왼쪽)와 지진계(오른쪽)에서 얻은 파열 신호(검은 선)와 두 파열 성분(빨강·파랑). 위치마다 다른 두 봉우리의 간격으로 파열 과정을 복원했다.

그림설명 및 그림제공 : 서울대학교 한상우 박사



(그림2) 작은 지진들이 단층의 이웃한 조각을 차례로 깨뜨리는 과정: 관측과 모형

(A) 관측: 3시간 동안 잇따라 일어난 작은 지진 16개. 색은 가장 큰 두 지진(그림의 M2・M1.8)의 단층 변위, 원은 나머지 지진의 위치와 추정 파열 크기(원의 색은 경과 시간), 별은 진원이다.

(B・C) 모형: M2 지진 이전에는 먼저 깨진 조각(줄무늬)이 넘겨준 응력이 이웃 조각의 가장자리에 쌓였고(B), M2 지진 당시에는 첫 번째 파열의 S파(붉은 고리)가 그 자리에 닿으며 두 번째 파열을 일으켰다(C).

그림설명 및 그림제공 : 서울대학교 한상우 박사

연구 이야기

<작성 : 서울대학교 한상우 박사>

□ 연구를 시작한 계기나 배경은?

그동안 우리 연구팀은 한반도에 설치된 지진계 자료로 국내 지진의 파열 과정을 자세히 분석하고, 이를 체계적으로 분석하는 시스템을 구축해 왔다. 이 기술을 수천 개의 센서처럼 촘촘한 광섬유 관측(DAS)에 적용하면 얼마나 더 작은 지진까지 현미경처럼 들여다볼 수 있을지 궁금했다.

□ 연구 전개 과정에 대한 소개. 연구하면서 어려웠던 점이나 장애요소는?

국내에서는 DAS 관측 자료도, 이를 분석한 연구도 아직 많지 않았다. 그래서 세계적으로 DAS 연구를 선도하는 미국 라이스대학교 조나단 아호-프랭클린(Jonathan Ajo-Franklin) 교수 연구팀을 직접 찾아가 국제공동연구를 시작했고, 이 연구팀이 캘리포니아에서 진행해 온 광섬유 관측(IVDF) 자료에 우리의 파열 분석 기술을 접목했다.

□ 이번 성과, 무엇이 다른가?

그동안 작은 지진은 주로 '어디서 일어났는가'를 나타내는 하나의 점으로 다뤄졌다. 이번 연구는 촘촘한 관측으로 작은 지진 하나를 '단층이 깨지는 물리적 과정'으로 해석했다는 점에서 관점의 전환을 보여 준다. 큰 지진은 같은 곳에서 수십~수백 년에 한 번 일어나지만, 작은 지진은 우리 주변에서 끊임없이 일어나 많은 사례를 꾸준히 관측할 수 있다. 이런 작은 지진의 파열 특성과 복잡한 과정을 자세히 들여다보면 지진이 일어나는 땅속 환경을 파악하는 데 도움이 될 수 있다.

□ 실용화된다면 어떻게 활용될 수 있나? 실용화를 위한 과제는?

DAS는 광섬유 설비를 통해 수천 대의 지진계를 설치한 효과를 낼 수 있다. 또한, 새로 케이블을 깔지 않고도 통신사가 이미 설치해 둔 광섬유로 지진파를 관측할 수 있어, 기존 통신 인프라를 지진 관측망으로 재활용할 수 있다. 다만 지진이 일어나는 방식은 지역의 지각 특성에 따라 다르므로, 여러 지역에서 관측 자료를 꾸준히 쌓는 것이 과제다.

□ 꼭 이루고 싶은 목표나 후속 연구계획은?

지진 연구는 과거에 일어난 지진의 기록에 기댄다. 지진은 규모가 1 작아질 때마다 그 수가 약 10배씩 늘어나므로, 관측 해상도를 높여 더 작은 지진까지 분석할 수 있다면 그만큼 많은 단서를 얻을 수 있다. 이렇게 지진의 비밀을 푸는 데 한 걸음 더 다가가고 싶다.

□ 기타 특별한 에피소드가 있었다면?

DAS 자료로 작은 지진의 파열을 포착할 수 있다는 것을 처음 확인한 것은 학회에 참석하던 중이었다. 새로운 발견에 들떠 낮에는 학회장에서 발표를 듣고, 밤에는 숙소에서 분석을 이어 가던 그때가 지금도 생생하다.

연구자 소개

<김영희, 교신저자>



1. 인적사항

○ 소 속 : 서울대학교 지구환경과학부
○ 전 화 : 02-880-6735

2. 학력

○ 2005 ~ 2011 미국 캘리포니아 공과대학교(Caltech) 박사 (지구물리학)
○ 2011 ~ 2012 미국 컬럼비아 대학교 라몬트-도허티 지구관측소 박사후연구원

3. 경력사항

○ 2025 ~ 현재 서울대학교 지구환경과학부 부학부장
○ 2025 ~ 현재 서울대학교 행성지질환경 연구소 소장
○ 2022 ~ 현재 지구심부-지표 상호작용 SRC 연구센터 센터장
○ 2022 ~ 현재 유네스코 국제지구과학프로그램(IGCP) 부위원장
○ 2012 ~ 현재 서울대학교 지구환경과학부 교수
○ 2023 기초연구진흥 유공 장관표창
○ 2020 서울대학교 자연과학대학 우수연구상
○ 2016 동아일보-포스텍 공동기획 개교 30주년 기념 '한국을 빛낼 젊은 과학자 30인' 선정(지구과학-천문 분야)

4. 전문분야 정보

○ 지구물리학・지진학 (지진 파열 과정 연구 및 지구내부 구조 영상화)

5. 연구지원 정보

○ 2022 ~ 현재 과학기술정보통신부·한국연구재단 기초연구사업
(집단연구지원사업, 선도연구센터육성사업(SRC))
○ 2022 ~ 현재 과학기술정보통신부·한국연구재단 기초연구사업(중견연구)

<한상우, 제1저자>



1. 인적사항

○ 소 속 : 서울대학교 지구환경과학부
(현 미국 워싱턴대학교 박사후연구원)

○ 전 화 : 02-880-6735(김영희 교수)

○ 이메일 : sangw876@snu.ac.kr

2. 학력

○ 2014 ~ 2021 서울대학교 학사 (지구환경과학・계산과학)

○ 2021 ~ 2026 서울대학교 박사 (지구물리/지진학)

3. 경력사항

○ 2026 ~ 현재 미국 워싱턴대학교 박사후연구원

○ 2024 ~ 2025 미국 라이스대학교 방문연구원

4. 전문분야 정보

○ 지구물리학・지진학 (지진 단층 구조 및 파열 과정 분석)

○ 지진계・분산음향센싱 배열 관측