



Article

1차원 지체구조와 유한 단층 모델을 이용한 난카이 지진 단층 모델에 의한 한반도 변위장 예측

전태환^{1,*}, 서기원²

¹서울대학교 교육종합연구원

²서울대학교 지구과학교육과

Seismic displacements in the Korean peninsula due to the Nankai earthquake estimated by using a finite fault model with 1-D Earth structure

Taehwan Jeon^{1,*}, Ki-Weon Seo²

¹Center for Educational Research, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

²Department of Earth Science Education, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

Received: September 30, 2024 / Revised: October 23, 2024 / Accepted: October 27, 2024

*Corresponding author: +82-2-880-4070 / E-mail: naiad123@snu.ac.kr

요약: 지난 2011년 동일본 대지진은 한반도 전역에 평균 3 cm에 달하는 뚜렷한 동지진 변위를 보여주어, 일본 주변의 대지진이 우리나라 측위에 상당한 영향을 줄 수 있다는 사실을 확인시켜 주었다. 최근 한반도 주변의 주요 섭입대 중 하나인 난카이 해곡에서 대지진 발생 가능성에 대한 우려가 높아지고 있다. 난카이 해곡 일대는 과거로부터 대략 100여 년을 주기로 규모 8.0 이상의 대지진이 반복되어 온 지역으로, 한반도에서 가장 가까운 섭입대로서 그 영향력이 클 것으로 예상된다. 이에 과거 난카이 해곡 인근의 대지진을 연구한 선행 연구들을 참고하여 가능한 유한 단층 모델을 몇 가지 가정 후, 이로 인한 한반도의 지진 유발 변위 양상을 살펴보았다. 서로 다른 위치, 경사, 면선각(rake), 깊이를 갖는 유한 단층 모델로부터 변위를 계산한 결과, Mw 8.5의 지진 단층에도 한반도가 남동 방향으로 최대 2.6 cm 정도 움직일 수 있음을 확인하였다. 특히 난카이 대지진의 예상 모델은 공통적으로 한반도의 동서 양단에 큰 변위 차를 보여주는데, 이는 해당 지진으로 인해 한반도 지반이 북서-남동 방향의 큰 전단력을 받을 수 있다는 점을 시사한다.

주요어: 난카이 지진, 동지진 및 후지진 변형, GNSS 변위

ABSTRACT: The 2011 Tohoku-Oki earthquake showed a significant co-seismic horizontal motion of an average 3 cm across the Korean Peninsula, showing a significant geodetic impact due to a megathrust event near Japan. Recently, there has been increasing concern about the possibility of another megathrust event near the Nankai Trough. This area has repeatedly experienced megathrust events of Mw 8.0 or higher with the period of 100 years or more. Further, the Nankai Trough is the closest subduction zone to South Korea, and the megathrust event in the region is expected to show the greater geodetic impact compared to its magnitude. Thus in this study, based on the fault parameters discussed in the previous studies, we examined the co- and post-seismic crustal motion on the Korean Peninsula due to the several possible fault slip models placed near the Nankai Trough. Numerical solutions of the earthquake-induced surface displacements considering various fault parameters, such as the location, dip, rake, and depth, show that the Korean Peninsula can experience a co-seismic horizontal displacement up to 2.6 cm toward the southeast direction due to a Mw 8.5 Nankai earthquake. Further, the predicted displacement fields commonly indicate a significant difference between the east and west ends of the Korean Peninsula, suggesting that the earthquake could subject the peninsula to the large shear stress in the northwest-southeast direction.

Key words: Nankai earthquake, co- and post-seismic deformation, GNSS displacement

1. 서론

해양판인 필리핀 해 판이 대륙판인 유라시아 판 아래로 섭입하면서, 두 판의 경계는 필리핀 남부에서 대만, 오키나와 열도, 일본 남부까지 광범위한 영역에 걸쳐 해구를 형성하고 있다. 이 중 일본 규슈 남단에서 후지 산까지의 해구를 난카이 해곡(Nankai Trough)이라 부르며, 이곳에서의 섭입 과정과 연관된 지진을 진원의 위치에 따라 서쪽부터 휴가나다(Hyuga-nada, 日向灘), 난카이(Nankai, 南海), 토난카이(Tonankai, 東南海), 토카이(Tokai, 東海) 지진 등으로 구역을 구분하여 지칭한다(Hirahara *et al.*, 2004; Saito *et al.*, 2019) (그림 1). 특히 혼슈 최남단 키이 반도를 중심으로 동쪽의 토난카이 구역과 서쪽의 난카이 구역은 지난 1944년과 1946년에 모멘트 규모(Mw) 8.0 이상의 지진이 발생하며 있어 특히 주목할 만한 지역이다(Fitch and Scholz, 1971; Kanamori, 1972). 역사적 기록으로 미루어 볼 때 난카이 해곡의 운동과 관련된 것으로 보이는 추정 규모 8.0 이상의 대지진은 약 100여 년 또는 그 이상의 주기를 갖고 발생해 온 것으로 보이며, 이때 단층 활동은 상기한 4개 구역 중 어느 한 곳에 국한되기보다 광역적, 연쇄적으로 발생하는 것으로 알려져 있다(Ando, 1975). 특히 1944년 토난카이 지진과 1946년 난카이 지진을 제외하면 지금까지 이 지역에서 Mw 8.0 이상의 대지진은 발생하지 않고 있다는 점을 고려해 볼 때, 가까운 시일 내에 이 지역에서 발생할 수 있는 대지진에 대해 경계할 필요가 있다. 일본에서는 역사적 지

진 기록과 함께 현대적 관측 및 수치 모델 예측 등을 종합하여 난카이 해곡 인근에서의 지진 패턴 분석과 발생 시기 예측에 상당한 주의를 기울이고 있다(Ando, 1975; Hyodo *et al.*, 2016). 지진 시기를 예측하는 것은 극히 어렵다는 점을 감안하더라도, 난카이 해곡의 서남단인 휴가나다 구역에서 발생하는 Mw 7 전후의 지진이 난카이 대지진을 촉발할 가능성이 있다는 수치 모델 연구들이 눈에 띄는데(Nakata *et al.*, 2014; Hyodo *et al.*, 2016), 극히 최근인 2024년 8월 8일에 Mw 7.1의 지진이 이 구역에서 실제로 발생한 직후 일본 기상청이 난카이 대지진의 가능성을 일시적으로 격상시켰던 것도 이러한 연구 결과와 무관하지 않은 것으로 보인다.

한편 우리나라는 일본 인근 섭입대에서 발생하는 대지진에 의해 상당한 영향을 받을 수 있으며, 실제로 지난 2011년 3월 11일 발생한 Mw 9.1 동일본 대지진은 일본 주변 대지진이 한반도에 미치는 영향력을 여실히 보여준 바 있다(Baek *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2018). 당시 한반도 GNSS (Global Navigation Satellite System) 관측소의 측위 자료는 동일본 대지진의 동지진(co-seismic) 변형으로 인해 우리나라가 진앙 방향으로 순간적으로 평균 약 3 cm 가량을 이동하였다는 사실을 명확히 보여주고 있다(Kim *et al.*, 2020). 이와 비교해 볼 때, 난카이 대지진이 실제로 발생할 경우 우리나라에 미칠 측지학적 영향력은 결코 작지 않을 것으로 예상된다. 우선, 한반도까지의 진앙거리가 1,000 km 이상이었던 2011년 동일본 대지진에 비해 난카이 해곡은 우리

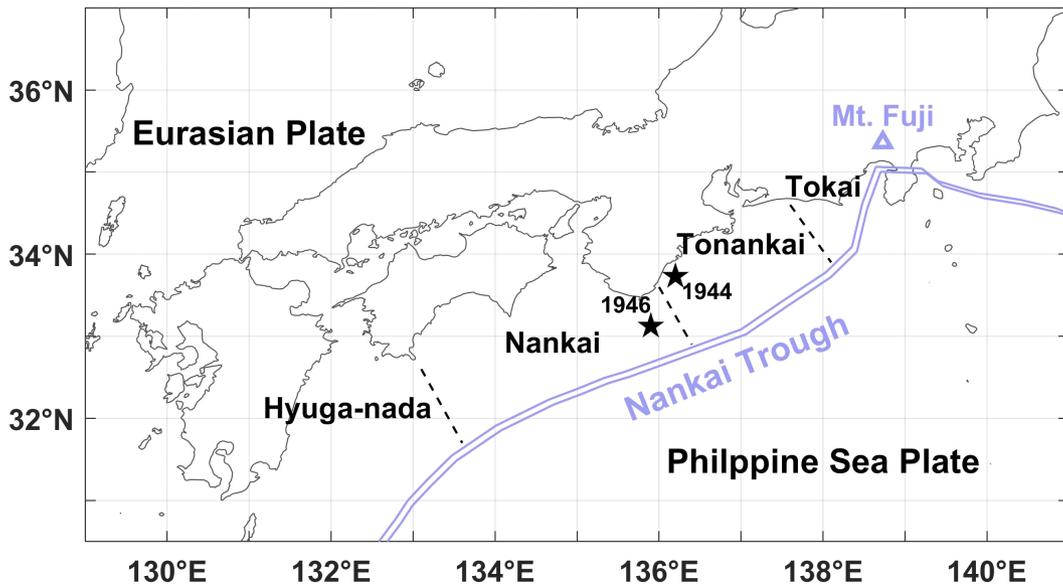


Fig. 1. Geological setting near Nankai Trough. The Philippine Sea Plate subducts under the Eurasian Plate toward the NNW direction, forming a broad subduction zone indicated as the blue double line. The boundary from Mount Fuji to the Southwest Japan is particularly referred to as Nankai Trough, typically divided into four areas of Hyuga-nada, Nankai, Tonankai, and Tokai, from the West to East. The black stars indicate the epicenter locations of the last two large earthquake events greater than Mw 8.0 occurred in this region, based on the earthquake catalog of the United States Geological Survey (USGS).

나라에서 가장 가까운 해구이며, 그만큼 한반도에 미칠 지각 변위의 크기가 규모에 비해 더욱 높을 것임을 예상할 수 있다. 특히 본 연구에서 조사한 결과 우리나라는 해당 지진원의 단층면 경사, 섭입 각도, 진원 깊이 등과 같은 여러 단층 변수(fault parameter)에 따라 경험하게 될 변위장이 크게 달라지는 것으로 나타나, 차후 발생할 난카이 해곡 주변 대지진의 여러 시나리오를 검토해야 할 필요성이 충분하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 난카이 해곡 주변에 역단층형 지진이 발생할 경우 한반도에 미칠 측지학적 영향력을 검토하고자 한다. 제시되는 결과는 모두 깊이에 따라 물성이 변하면서 구형인 지구 내부에서 유한한 크기의 단층면이 유발하는 측지 반응을 고려하는 수치 모델(Pollitz, 1996, 1997)을 이용하였다. 우선 사용된 수치 모델의 타당성을 확인하기 위해 다양한 지진학 및 측지학 방법론을 통해 도출된 2011년 동일본 대지진의 유한 단층 모델을 바탕으로 변위장을 계산하여, 한반도 GNSS 관측 자료와 비교 및 검증하였다. 이어서, 지난 1944년 토난카이 지진 및 1946년 난카이 지진에 대한 여러 연구 결과들을 참고하여 가능한 변수 범위 내에서 난카이 대지진에 대한 단층면 후보들을 설정하였으며, 이로부터 한반도 주요 GNSS 관측소에서의 예상 변위를 산출하였다. 이러한 계산 결과를 토대로, 난카이 대지진이 한반도 지각 변형에 미칠 영향을 검토하고자 한다.

2. 방법론

2.1. 지체구조 및 지진 효과 계산 모델

본 연구에서 사용한 수치 모델(Pollitz, 1996, 1997)은 직교 좌표 내에 균일한 매질을 가정한 초기 모델(Okada, 1985; Okubo, 1992)보다 발전되어, 깊이에 따른 층상 구조를 갖는 구형 지구를 이용한다. 이때 단층면이 유발하는 지표 변위와 중력 변화를 정상 모드 이론(Normal mode theory)을 적용하여 구면 조화 함수의 형태로 산출하는 특징이 있으며, 이전 모델들이 동지진(co-seismic) 효과만 계산할 수 있었던 것과 달리 시간에 따른 후지진(post-seismic) 효과 또한 계산할 수 있다는 장점이 있다.

동지진 반응의 경우, 가장 큰 영향을 미치는 요소는 1차적으로 경사, 주향, 면선각(rake)과 같은 단층면의 변수(parameter)들이며, 여기에 응력이 전달되는 양상에 영향을 미치는 탄성 계수의 분포가 중요한 역할을 한다. 한편, 후지진 반응에 가장 민감한 영향을 미치는 요소는 탄성 두께(elastic thickness)와 연약권의 점성(asthenosphere viscosity)으로, 얇은 탄성 두께와 낮은 연약권 점성은 더욱 급격한 후지진 변화에 기여한다. 때문에 동일한 후지진 변화를 두꺼운 탄성 두께와 낮은 연약권 점성, 혹은 얇은 탄성 두께에 높은 연약권

점성의 두 가지 조합으로 설명이 가능하다는 불확정성이 있는데(Han *et al.*, 2016), 통상 그 중 한 가지 조합은 지질학적 조건을 고려해 보았을 때 성립하기 어려운 탄성층의 분포(e.g., 진원 깊이보다 얇은 탄성 두께)나 이전에 알려진 연약권의 점성 범위에서 크게 벗어나는 경우가 많아 이를 고려하여 추정 범위를 합리적으로 좁힐 수 있다.

무엇보다도 본 연구에서 활용한 수치 모델들은 PREM (Preliminary Reference Earth Model) (Dziewonski and Anderson, 1981)과 같이 밀도, 탄성계수, 점성 등이 깊이에 따라서만 변화하는 1-D 모델을 채용하고 있기 때문에 수평 방향의 불균일성(heterogeneity)에 의한 오차는 계산 정확도의 한계점으로 작용할 수 있다. 예를 들어 1-D 지체구조를 고려한 수치 모델은 탄성 계수의 수평적 차등 분포가 고려되어 있지 않으므로, 그로 인해 실제 관측된 결과보다 예측된 동지진 변위장에 약간의 오차가 발생할 수 있다. 또한 후지진 변형은 여기에 추가로 점성의 크기 및 분포가 개입하기 때문에 더욱 복잡한 오차를 내포할 수 있다. 예를 들어 3-D 모델과 1-D 모델의 차이를 분석한 선행 연구의 결과를 보면, 섭입판의 이질성을 고려하지 못하는 1-D 모델은 동일 점성에 대해 3-D 모델 예측보다 약 10%에서 20% 정도 큰 후지진 변화를 산출하는 경향을 보인다(Tanaka *et al.*, 2015). 이 때문에 1-D 모델은 관측된 후지진 변화를 실제보다 약간 더 큰 점성으로 설명하는 결과로 이어질 수 있다(Jeon *et al.*, 2023).

이러한 특성을 감안하여 본 연구에서는 1-D 모델을 활용한 선행 연구들에서 고려된 물성 범위를 참조하여 지체구조를 설정하였다. 우선, 깊이 별 체적 계수(bulk modulus), 전단 계수(shear modulus) 및 밀도(density)의 분포 양상은 PREM 모델의 값을 이용하였다. 일본 주변 해역의 탄성 두께는 해저면의 만곡률(flexure)을 바탕으로 추정된 연구(Levitt and Sandwell, 1995)와 2011년 동일본 대지진의 후지진 변화를 분석한 연구(Han *et al.*, 2014; Jeon *et al.*, 2023) 모두에서 약 60 km 에서 70 km 범위를 지시하고 있어 이를 이용하였다. 한편, 지오이드의 분포와 광물학적 및 열적 모델을 바탕으로 전 지구적인 1-D 점성 모델을 연구한 Steinberger and Calderwood (2006)는 연약권(깊이 ~220 km)에서 약 10^{20} Pa s, 상부 맨틀(220-670 km)에서 약 10^{21} Pa s, 하부 맨틀(670-2,900 km)에서 약 10^{22} Pa s 전후의 점성을 제시하였으나, 이 값을 수용할 경우 연약권 점성이 과도하게 높아 후지진 효과는 거의 나타나지 않는 결과를 얻게 된다. 실제로 해당 연구에서, 사용된 방법론이 연약권과 전이대(transition zone, ~670 km)의 점성을 분리하여 추정하지 못하는 문제(trade-off)가 있어 연약권 점성 추정치의 불확실성을 언급한 바 있다. 그에 반해 판의 이동 속도장(Dogliani *et al.*, 2011; Saxena *et al.*, 2023)이나 후지진 효과(e.g., Pollitz (2019)의 표 1에 제시된 여러 연구들)와 같은 측지학적 현상들은

Table 1. Six finite fault models located near the Nankai Trough tested in this study. A single fault plane with the seismic moment of 6.3×10^{21} N m (Mw 8.5) is assumed for all cases. Horizontal length of the fault plane is fixed to be 250 km, and the width (dip-directional length) is variable depending on the dip and depth range.

Model	Strike	Dip	Rake	Depth range	Fault center at	
					Lon.	Lat.
F1	250°	10°	90°	20 ± 10 km		
F2	250°	10°	90°	15 ± 10 km		
F3	250°	20°	90°	20 ± 10 km	134.5°E	33.0°N
F4	250°	10°	120°	20 ± 10 km		
F5	250°	20°	120°	20 ± 10 km		
F6	230°	10°	120°	20 ± 10 km	137.0°E	34.0°N

연약권의 점성 조건에 긴밀하게 결부되어 있으며, 이러한 연구들은 공통적으로 10^{17} 에서 10^{19} Pa s 범위의 연약권 점성을 가정할 때 관측값이 잘 설명된다는 것을 보여준다. 반면 연약권 이하 상부 맨틀 및 하부 맨틀의 점성 조건은 후지진 효과로는 거의 식별할 수 없는데, 이는 220 km 이하 심부의 점성 조건이 후지진 효과 예측에 미치는 영향은 극히 적다는 의미와도 같다. 본 연구에서 사용한 후지진 모델 (Pollitz, 1997) 또한 상부 및 하부 맨틀의 점성을 Steinberger and Calderwood (2006)가 제시한 값보다 10배 작은 값을 적용하더라도 표면에서의 후지진 변화의 크기는 2% 내외의 차이만을 보이는 것이 확인된다.

2.2. 2011년 동일본 대지진에 대한 지진 모델 검증

이렇게 가정한 1-D 수치 모델의 정확도를 검토하고자 지난 2011년 동일본 대지진을 대상으로 몇 가지 유한 단층 모델에 따른 측지 응답을 시험 계산하고, 이를 관측된 중력 및 표면 변위와 비교하는 과정을 거쳤다. 관측된 측지 자료로서, 한반도 GNSS 자료와 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 중력 위성 자료를 이용하였다. 중력 위성 자료는 텍사스 대학의 CSR (Center for Space Research)에서 제공하는 RL06 level-2 자료를 이용하였으며 (Tapley *et al.*, 2019), 한반도 GNSS 측위 자료는 네바다 측지 연구소 (Nevada Geodetic Laboratory)에서 처리 및 제공하는 자료를 사용하였다 (Blewitt *et al.*, 2018).

그림 2는 우리나라 8개 GNSS 관측소의 수평 변위 기록을 나타내며, 1년 및 반년 주기 신호는 제거된 것이다. 그림 2a에서 2h까지 보듯, 우리나라 GNSS 관측소에서는 2011년 3월 11일(수직 점선으로 표시) 전후로 주로 동쪽 방향의 급격한 동지진 변화가 수 cm 가량 확인되며, 이 낙차를 계단 함수가 포함된 선형회귀모델을 이용하여 측정하였다. 예를 들어, 지진 발생 시점을 $t = 0$ 로 둔 연 단위의 시간 t 에 대해 매 시점의 동서 혹은 남북 방향의 수평 변위를 $d(t)$ 라고 하면, 지진 전의 변화는 다음과 같이 1차 함수로 근사할

수 있다.

$$d(t) = A_1 t + B_1 \quad (t < 0) \quad (1)$$

반면 지진 후의 변화는 여기에 다음과 같이 동지진 및 후지진 변화를 모의하기 위한 항을 추가하여 근사할 수 있다 (Tobita, 2016; Jeon *et al.*, 2023).

$$d(t) = A_2 t + B_2 + C \ln(1 + t/\tau_1) + D(1 - \exp(-t/\tau_2)) \quad (t \geq 0) \quad (2)$$

이때 동지진 변위는 $B_2 - B_1$ 으로 얻을 수 있다. 후지진 변화를 모의하기 위한 로그 및 지수 함수들은 동지진 변위를 결정하는 매개변수 B_2 를 더욱 정확하게 산출하기 위한 목적으로 경험적으로 선택되었다. 일부 관측소에서는 2011년 이후 후지진 신호 외에도 여러 원인으로 인한 변동성이 포함되어 있는 것으로 보이기 때문에(그림 2) 오차 요인을 최소화하기 위하여 비교적 짧은 기간의 변화인 지진 후 3년간의 후지진 변화에 집중하여 근사하였다. 본 연구에서는 $\tau_1 = 1$, $\tau_2 = 5$ 의 값을 사용하였으나, 사실상 1에서 10 사이의 임의의 값을 고르더라도 동지진 변위의 값은 0.1 cm 내외의 범위에서 대체로 비슷하게 도출되었다. 그림 2a에서 2h까지의 검은 선이 이와 같은 선형회귀모델을 이용한 근사선이며, 동지진 변위로 인한 불연속적인 낙차가 비교적 잘 추정된 것을 확인할 수 있다. 다만 그림 2c의 소백산 천문대(SBAO) 관측소의 경우 사용한 GNSS 관측값의 남북 방향 성분은 알 수 없는 원인으로 수년 주기 신호가 나타나고 있는데, 이 신호가 지진 발생 시점과 겹치면서 남북 방향의 동지진 변위가 부정확하게 추정된 것으로 보인다. 추가로 그림에 나타난 모든 시계열에서 식(1)에 의한 지진 전 선형 성분은 각 지점의 평균적인 판 이동 속도로 간주하여 보정되어 있으며, 보정된 지진 전의 속도 벡터는 그림 2i에 별도로 표시하였다. 또한 GRACE 위성 중력 자료에 대해

서도 이와 유사한 선형회귀모델을 적용할 수 있으며, 이를 통해 모든 격자 위치에서의 동지진 중력 변화 또한 얻을 수 있다.

이와 같이 측지 관측 자료에 $B_2 - B_1$ 값을 이용해 얻은 동지진 측지 변화를 모델이 예측한 값과 비교해 볼 수 있다. 이때 동지진 변화에 가장 중요한 변수인 유한 단층 모델은 지진파 자료를 기반으로 도출된 모델 A (Shao *et al.*, 2011)와 중력 변화를 역산하여 도출된 모델 B (Jeon *et al.*, 2023) 두 가지를 시험하였다. 특히 측지학적인 유한 단층 모델의 역산은 GNSS 및 SAR와 같은 지표 변위 관측값이 그동안 널리 활용되어 왔는데 (Banerjee *et al.*, 2007; Song and Lee, 2018) 최근에는 GRACE 위성이 측정한 중력 변화를 바탕으로 진원 특성을 연구하는 시도도 이루어지고 있으며 (Han *et al.*, 2011; Jeon *et al.*, 2023) 모델 B는 이를 이용한 중력

기반 역산 모델이다.

그림 3은 서로 다른 방법론을 기반으로 만들어진 두 가지 유한 단층 모델 A, B로부터 동아시아 지역의 중력 변화와 한반도의 8개 GNSS 관측소 지점에서의 표면 수평 변위를 계산하여 비교한 것이다. 그림 3a는 2011년 동일본 대지진으로 인한 동지진 중력 및 수평 변위를 나타내며, 왼쪽 상단의 범례는 한반도 동지진 수평 변위 벡터의 평균을 나타낸다. 앞서 언급한 소백산 천문대(SBAO; 그림 2c)의 남북 방향 성분에 포함된 오차 때문에 해당 벡터의 방향이 다소 다르다는 점을 제외하면, 한반도 GNSS 관측값은 전반적으로 진원 방향인 동쪽으로의 움직임을 고르게 잘 보여주고 있다. 그림 3b는 유한 단층 모델 A의 중력 및 한반도 수평 변위 예측값으로서, 이에 더해 배열된 유한 단층 모델의 수평 정사영은 파란 사각형으로, 각각의 슬립 벡터의 평균은

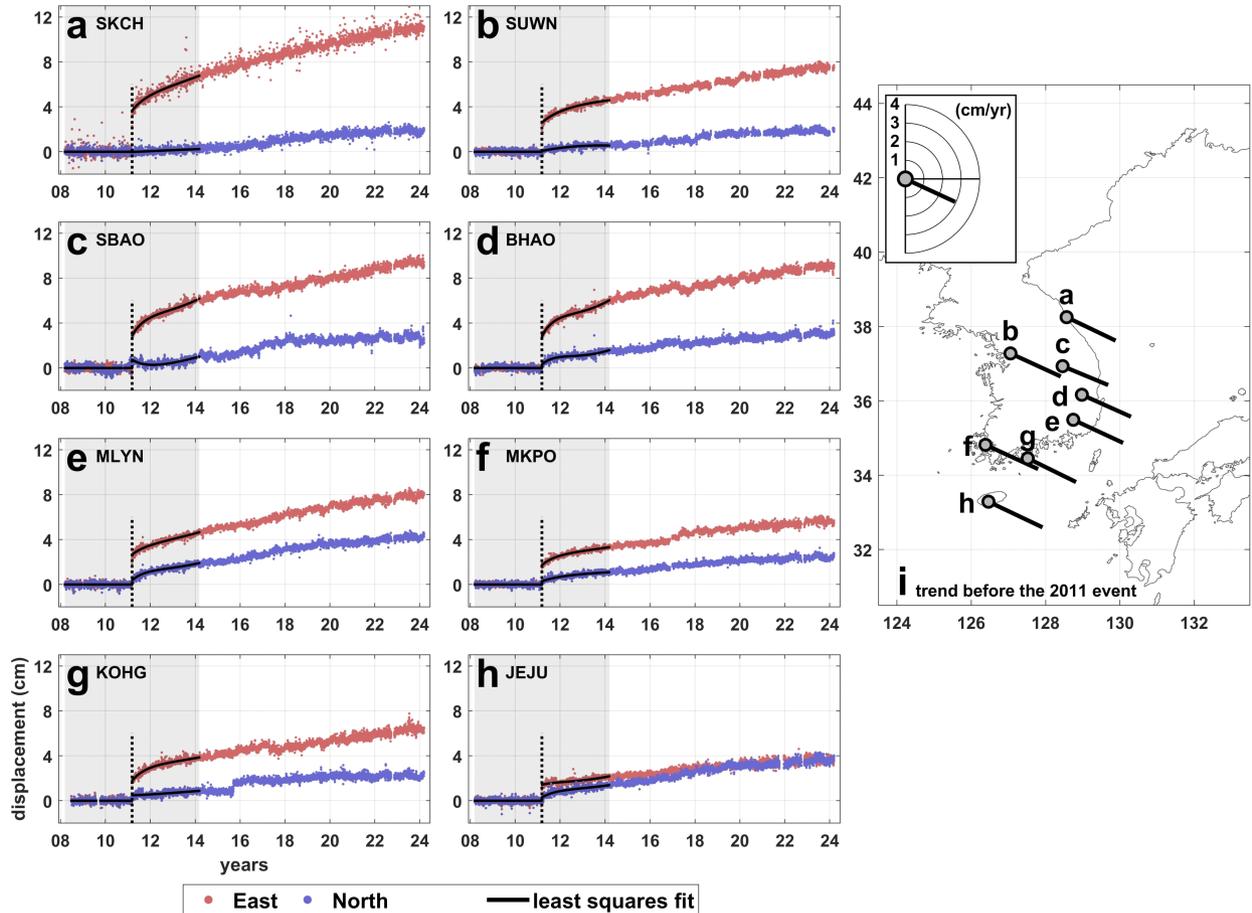


Fig. 2. Daily eastward (red) and northward (blue) surface displacements from March 2008 to the present observed at GNSS stations of SKCH (a), SUWN (b), SBAO (c), BHAO (d), MLYN (e), MKPO (f), KOHG (g), and JEJU (h). The vertical dotted line represents 11 March 2011, the date of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. The black curves are the least squares fits as explained in equation (1) and (2) in the main text. Note that the annual and semi-annual variations, and the background trend before the 2011 event were removed from all time series from (a) to (h). The background plate motion estimated by the mean trend for 3 years before the 2011 event are provided in panel (i). The vector shown in the box of panel (i) shows the mean of the pre-seismic trend of 8 GNSS stations examined here.

상반의 움직임 기준으로 오른쪽 상단에 진원기구해와 함께 표시하였다. 해당 모델은 주향 198°, 경사 10°의 475 km (주향 방향) × 200 km (경사 방향) 크기 단층면을 190개 조각으로 세분한 상세한 단층 해상도를 갖고 있으며 지진 모멘트(seismic moment) 총합은 약 5.2×10^{22} N m이다. 그림 3c에 나타난 유한 단층 모델 B는 그림 3a에 나타난 GRACE 중력 위성이 관측한 지진 전후의 중력 차이를 역산하여 얻은 것이다. 역산에 이용한 위성 중력 자료가 저해상도라는 점을 감안하여 그림 3b의 모델은 파란 사각형으로 표시한 것처럼 주향 198°, 경사 10°의 150 km × 200 km 크기 단층 조각 3개로 큼직하게 설정하였다. 역산 결과 총 지진 모멘트는 약 4.9×10^{22} N m로 모델 A와 유사한 규모로 산출되었다.

하지만 그림 3b와 3c의 좌측에서 보듯, 두 모델 A, B를 그대로 수용하여 계산된 우리나라 GNSS 관측소 지점에서의 동지진 수평 변위는 그 크기가 관측값에 비해 상당히 부족하다는 점을 알 수 있다. 몇 가지 추가 시험 결과, 이러한 차이를 만드는 가장 중요한 변수는 단층의 경사로 확인되었다. 단층에 인접한 지점의 변위장은 유한 단층의 크기와 해상도에 큰 영향을 받아 복잡한 양상을 나타내는 것에 반해, 단층의 크기에 비해 진원거리가 충분히 먼 지점에서는 응력의 주축(principal axis)이 수평면과 정렬하는 45° 경사면에 가까울수록 더욱 큰 수평 변위를 보이는 경향성을 나타냈다. 때문에 한반도 GNSS 관측소의 동지진 수평 변위는 단층면의 경사를 10°보다 15°로 가정할 때 더욱 근사적으로 재현되는 것을 확인하였다. 그림 3d와 3e는 앞서 적

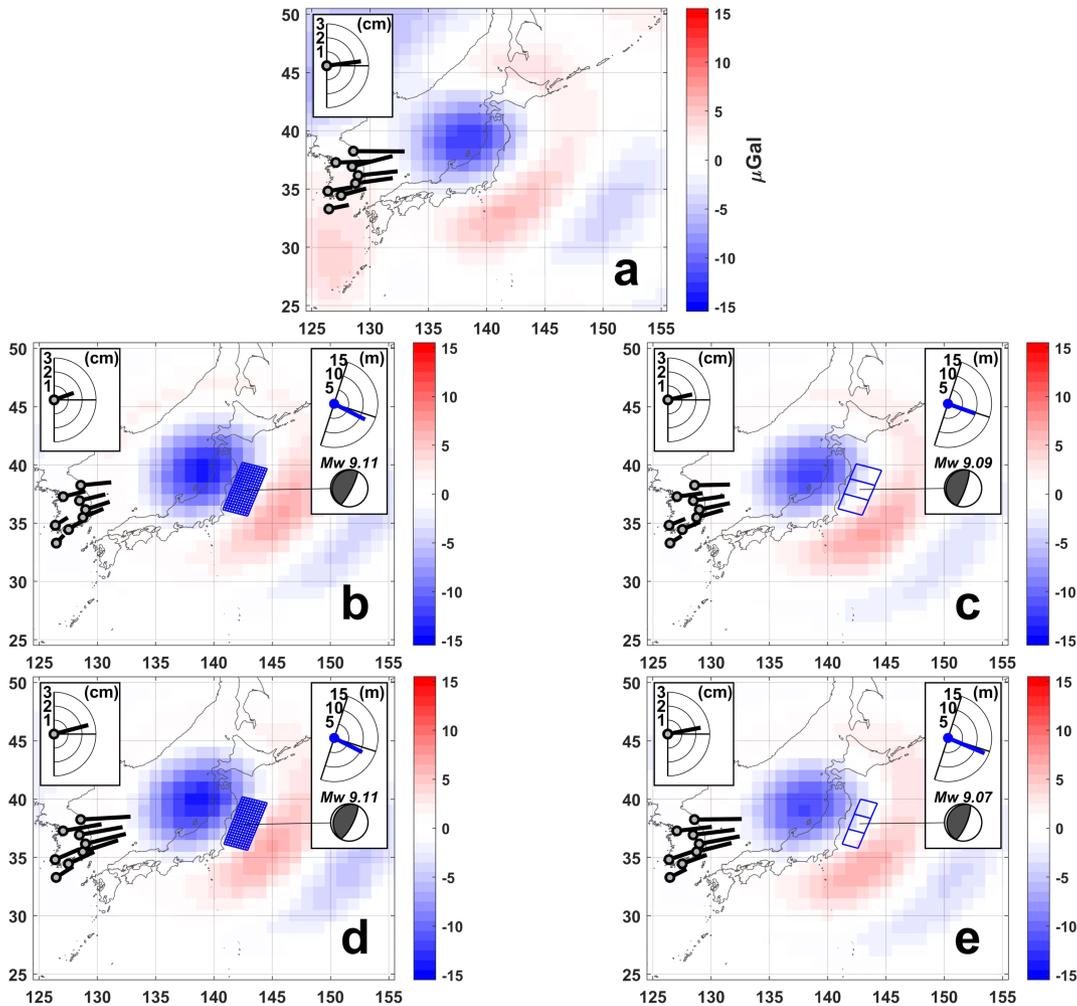


Fig. 3. Co-seismic gravity change and horizontal motion from models and observations. (a) Co-seismic gravity changes observed by GRACE satellite gravimeter and co-seismic horizontal motion detected at 8 GNSS stations in Korea (black lines). The box in the upper-left corner includes the mean vector of horizontal motions. (b) Similar to (a) but estimated by finite fault model A. It additionally includes the horizontal projections of the sub-faults (blue rectangles), as well as the mean slip vector of sub-faults (blue line), and the focal sphere with moment magnitude in the upper-right box. (c) Similar to (b), but based on model B. (d-e) Similar to (b) and (c), respectively, but the dips of models A and B were changed to 15 degree, instead of 10 degree.

용했던 모델 A와 B의 경사를 모두 10°에서 15°로 변경하고 동일한 계산을 수행한 결과로서, 양쪽의 예측값 모두 관측된 한반도 GNSS 변위와 크게 유사해진 것을 확인할 수 있다. 하지만 앞서 설명한 대로 계산에 쓰인 수치 모델이 수평적인 물성 차등을 반영하고 있지 않다는 점을 고려하면, 반영되지 않은 수평 방향의 지구조 불균일성과 단층 경사의 효과가 상쇄되어 나타난 겉보기 효과일 가능성도 있음을 유의할 필요가 있다. 또한 그림 3d와 3e에서 경사가 변경된 유한 단층 모델의 예측값과 그림 3a에 주어진 관측된 벡터들을 비교해 보면 비교적 동서 방향 동지진 변위 성분은 잘 일치하는 것에 반해 남북 방향 변위에서 다소 차이가 있는 것을 확인할 수 있는데, 이는 선형회귀모델을 통해 관측된 동지진 변위를 정량화하는 과정에서 생긴 오차와, 우리나라 지체구조의 수평 방향 불균일성이 고려되지 않은 1-D 모델의 한계점에서 기인한 오차 모두가 반영된 결과로 해석된다.

모델 B의 경우 낮은 단층면 해상도 때문에 일본 북동부와 같이 근거리에서 위치한 GNSS 변위 예측에는 큰 오차를 포함할 가능성이 높지만, 그림 3d와 3e의 유사성이 보여주듯 한반도의 GNSS 변위장을 이해하는 데에는 상당히 유용하다는 점을 보여준다. 또한 일본 주변 대지진이 한반도에 미치는 효과를 알아보고자 할 때 지진학 및 측지학 연구 결과를 폭넓게 고려하여 단층 변수(fault parameter)를 조정할 단순한 모델도 효과적으로 활용될 수 있다는 사실도 내포하고 있다. 따라서 이를 바탕으로, 아래에서 설명할 난카이 해곡 근방의 예상 지진원에 대해 비교적 단순한 유한 단층 모델을 가정하여 한반도 변위 응답의 전반적인 양상을 살펴보고자 한다.

2.3. 난카이 해곡 주변 유한 단층 모델의 설정

난카이 해곡 주변의 역사적 대지진을 연구한 Ando (1975)는 난카이 구역에 대해 $2.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 토난카이 구역에 대해 $1.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 의 단층을 20°에서 25°의 경사면으로 배열하고, 이 중 일부 혹은 전부를 이용하여 과거 대지진들의 단층 활동을 추정하였다. 1944년 토난카이 지진에 대해서 Kikuchi *et al.* (2003)은 $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 크기의 15° 경사 단층면의 활동으로 모의하였고, Kanamori (1972) 또한 $1.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 크기의 10° 경사면으로 간주하였다. 한편 1946년 난카이 지진 단층면은 이보다 대체로 큰데, 측지 자료를 이용하여 역산한 Fitch and Scholz (1971)는 가장 합리적인 단층면을 30°에서 40°의 경사를 갖는 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 크기의 면으로 추정하고 $7.8 \times 10^{21} \text{ N m}$ 의 지진 모멘트를 산출하였다. Murotani *et al.* (2015) 또한 측지 관측 자료를 지진파 관측 자료와 접목하여 유한 단층 모델을 역산한 결과 $5.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 크기의 단층면에 대해 $5.5 \times 10^{21} \text{ N m}$ 의 지

진 모멘트를 추산하였다. 반면 지진파 분석만으로 1946년 난카이 지진을 분석한 Kanamori (1972)는 해당 지진의 모멘트를 $1.5 \times 10^{21} \text{ N m}$ 로 추정하였는데, 이는 다른 선행 연구들에 비하여 상당히 낮은 값이다. 최근 연구에서는 난카이 해곡 아래로 섭입된 해산(seamount)이 지진성 파열을 저해하는 요소로 작용하여 지진파를 이용한 규모 추정이 저평가되었을 가능성을 제기하였다(Kodaira *et al.*, 2000). 한편 선행 연구들에서 고려된 지진 단층면의 최대 분포 깊이는 많아도 40 km를 넘지 않는 범위에서 설정되고 있다. 특히, Hyndman *et al.* (1995)은 난카이 해곡 일대의 지열 모델을 추정하고, 이를 바탕으로 지진이 발생할 수 있는 최대 깊이를 450°C 등온선을 기준으로 약 30 km 이내일 것이라 추정한 바 있는데, 최근 연구에서 고려되는 단층면의 깊이도 이를 주요하게 감안하고 있다(Furumura *et al.*, 2011; Murotani *et al.*, 2015).

선행 연구들이 고려한 단층 변수들의 평균적인 범위를 참고하여, 본 연구에서는 다음과 같은 변수 범위를 고려하였다. 난카이 구역에서 250°, 토난카이 구역에서 230°의 주향을 갖는 단일 사각형 단층면을 가정하였고, 크기는 주향 방향으로 길이 250 km, 상단에서 하단까지 깊이 범위를 20 km로 고정하였다. 경사는 10° 혹은 20°인 경우를 비교하였는데, 깊이 분포 범위를 고정했으므로 단층면의 경사 방향 길이는 경사 10°일 경우 약 115 km이며, 경사 20°일 경우 약 58 km가 된다. 단층면의 깊이가 달라지는 경우 또한 가정하였는데, 상기한 대로 선행 연구에서 설정한 범위를 고려하여 최대 깊이는 30 km를 넘지 않게, 최저 깊이는 해저면에 준하는 5 km보다 얕지 않도록 배열하였다. 전단 계수(shear modulus)는 단층면의 분포 깊이에 따라 PREM 모델에서 제시하는 값을 기준으로 적용하였으며, 동일 규모 대비 변위 효과를 표준화하여 알아보기 위해 모든 경우에서 Mw 8.5, 즉 $6.3 \times 10^{21} \text{ N m}$ 의 지진 모멘트를 갖도록 통일하였다. 이때 동일한 기하학적 조건을 가진 단층에서 다른 규모의 지진이 일어난 경우를 이해하고자 할 때에는, 단층의 기하학적 조건이 같을 때 측지 응답의 세기와 지진 모멘트가 정비례하는 성질을 이용하여 계산된 변위장의 세기를 지진 모멘트의 비율만큼 선형으로 조정하여 그 양상을 간편하게 이해할 수 있다.

이를 반영한 6가지 유한 단층 모델을 설정하였으며, 표 1에 구체적인 변수들을 나열하였다. 단층 F1부터 F5까지는 깊이와 경사, 면선각(rake)이 다른 난카이 구역 단층면을 나타내고 있으며, 단층 F6은 단층 F4와 같은 형태를 토난카이 구역에 주향과 위치만 달리 하여 배치한 것이다. 단층 F1를 기준으로 F2는 동일한 조건에 깊이가 달라지는 경우를, 유한 단층 모델 F3은 경사가 다른 경우를 비교한다. 단층 F4는 F1에 대비해 우수향(right-lateral) 성분이 추가되

Table 2. Two different 1-D viscosity models for the asthenosphere considered in this study. In each model, the asthenosphere was assumed to have a uniform viscosity value listed below. Viscosities of the upper mantle (220-670 km depth) and the lower mantle (670-2900 km) were set to be 10^{21} and 10^{22} Pa s, similar to the values from Steinberger and Calderwood (2006), and other properties such as density and elastic moduli are equal to the PREM model.

Asthenosphere model	Depth range	Kelvin viscosity	Maxwell viscosity
V1	65-220 km	-	5×10^{18} Pa s
V2	65-220 km	1×10^{18} Pa s	3×10^{18} Pa s

어 단층 운동의 방향이 우리나라 쪽으로 더욱 편향된 경우를 고려한 것이다. 이는 1707년 호에이 대지진 때에 난카이 구역이 110° 이상의 면선각으로 파열되었을 것이라 추정된 선행 연구를 반영한 것이다(Furumura *et al.*, 2011; Chesley *et al.*, 2012). 한편 단층 F5는 단층 F1, F3, F4에서 가정한 조건들이 모두 중첩된 경우를 상정하였다.

2.4. 연약권 점성 모델의 설정

본 연구에서 사용한 후지진 효과 계산 모델(Pollitz, 1997)은 주어진 단층의 슬립 벡터들이 만드는 응력장으로부터 모델 내에서 설정한 연약권의 조건에 따른 맨틀의 지연적인 반응을 계산한다. 이때 단층 운동의 크기나 방향에 의한 응력장(stress field)은 각 지점이 움직일 변위의 경로를 대부분 결정하며, 그 위치에 도달하기까지 걸리는 시간이 점탄성 모델에 따라 달라지는 형태로서 모의된다. 이를 위해 연약권의 점탄성 모델을 선행 연구(Jeon *et al.*, 2023)에서 추정된 값을 응용하였다. 해당 결과는 2011년 동일본 대지진에 의해 발생한 동아시아 주변 지역의 후지진 중력 및 지각 변위가 약 3×10^{18} Pa s 또는 5×10^{18} Pa s의 맥스웰 점성(Maxwell viscosity)를 갖는 65-220 km 깊이 범위의 연약권을 설정하였을 때에 잘 설명된다는 사실을 지시하고 있다. 본 연구에서는 이러한 조건 범위를 고려하여 두 개의 점성 모델 V1, V2를 표 2와 같이 설정하였다.

모델 V1은 맥스웰 모델(Maxwell rheology)을, 모델 V2는 단기적인 비선형 반응을 근사하기 위한 버거스 모델(Burgers rheology)을 모의하고 있다. 장기적인 후지진 변형의 양상은 대부분 맥스웰 점성의 값에 의해 설명되기 때문에, 맥스웰 점성이 낮은 모델 V2은 V1보다 더욱 급격한 후지진 변형 속도를 나타내게 된다. 또한 탄성적인 동지진 변형의 반응이 크게 나타난 단층은 그만큼 큰 응력을 전달한 것이 되므로, 충분한 시간이 지난 이후에 수렴하게 되는 후지진 변형의 최대값 또한 증가시킨다. 가령 동지진 변형이 컸던 유한 단층 모델이라면 다른 모델에 비해 동일한 연약권 점탄성 조건에 대해서도 더욱 큰 후지진 변형을 만들게 된다. 또한 연약권 이하 맨틀의 점성 조건은 Steinberger and Calderwood (2006)의 값을, 밀도와 탄성 계수와 같은 값들은 PREM 모델의 값을 적용하였으나, 앞서 2.1절에서 설명하였듯이 이

들 조건들이 후지진 변화에 미치는 영향은 아주 작다는 점을 밝힌다.

3. 결과

3.1. 난카이 해곡 주변 유한 단층 모델에 의한 한반도 동지진 수평 변위

그림 4는 표 1에서 나열한 6가지 유한 단층 모델을 기반으로 우리나라 8개 GNSS 관측소 위치에서 계산된 동지진 변위의 벡터를 나타낸 것이다. 그림 4a와 4b는 깊이 조건이 다른 유한 단층 모델의 예측 차이를 보여주는 결과로, 깊이가 더 깊은 모델 F1에서 우리나라의 동지진 수평 변위가 더욱 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. 중심 깊이 20 km를 가정한 모델 F1에 의한 최대 변위는 8개 관측 위치 중에서 진앙거리가 가장 가까운 보현산 천문대(BHAO)에서 1.2 cm로 최대 변위가 나타났으나, 깊이가 5 km 더 얕은 모델 F2에서는 0.8 cm로 감소하였다. 이보다 더 깊게 단층을 배열하면 더 큰 변위 예측을 얻는 것도 가능하지만, 선행 연구(Hyndman *et al.*, 1995)에서 지목된 이 지역의 열적인 지진 깊이 한계를 고려한다면 절단면이 30 km 이상의 깊이까지 유의미하게 연장되는 단층의 발생 가능성은 다소 낮을 것으로 생각된다. 그림 4c는 단층 F1에 비해 단층면 경사를 20° 도로 더 크게 설정한 단층 F3의 의한 효과를 모의한 것으로서, 단층면의 경사가 커질수록 우리나라 수평 변위 또한 더욱 크게 나타나는 결과를 보여주고 있다. 모델 F1에 비해 F3 쪽이 두 배 가까이 큰 수평 변위를 보였으며, 최대 2 cm 이상의 변위가 계산되었다. 이 또한 경사를 더 크게 두어 더욱 큰 변위를 얻는 것도 가능하지만, 지진파 탐사를 통해 추정된 섭입된 해양판의 각도는 지각 뿌리가 깊은 키이 반도 하부를 제외하면 난카이 구역 대부분에서 대략 10° 내외로 보이기 때문에(Baba *et al.*, 2006), 대륙판과 해양판의 접촉면에서 대지진이 발생한다고 가정할 경우 여기서 고려된 약 20° 전후의 경사가 합리적인 범위에서의 최대 상한선으로 보인다. 그림 4d에 나타난 단층 F4는 모델 F1과 동일한 단층면 상에서 역단층의 운동 방향에 우수향(right-lateral) 성분이 추가된 경우를 가정한 것이다. 이 경우 단층 운동의 축선이 우리나라 쪽으로 편향됨에 따라 한반도 동지진 수평 변위의 크기도 커지게 된다. 변위장의 방향이 회

전함에 따라 보현산 천문대(BHAO)와 밀양(MLYN) 관측점 양측에서 약 1.5 cm의 최대 변위가 동등하게 나타났다.

이와 같이 모델 F1에서 F4까지의 결과는 깊이가 깊고 경사가 급하면서, 우수향 운동이 포함된 역단층일 경우 우리나라 표면 변위가 더욱 강하게 나타난다는 것을 보여준다. 이 조건들의 상한만을 고른 것이 그림 4e로서, 그림에서 보듯 상당히 큰 동지진 변위장을 얻을 수 있다. 이 경우 한반도 남동부는 Mw 8.5 지진원에도 3 cm 가까이 이동할

가능성이 있으며, 이는 2011 동일본 대지진에 의한 변위량과 유사한 수준이다(그림 2). 또한 비교적 보수적인 조건에 해당하는 모델 F1에 비하면 모든 지점에서 수평 변위의 크기가 두세 배 가량 차이가 난다는 것 또한 알 수 있는데, 이는 난카이 대지진 단층면의 기하학적 조건에 따라 우리나라의 지각 변형 양상이 극단적으로 달라질 수 있다는 점을 의미하고 있다.

그림 4f는 키이 반도 동쪽, 토난카이 구역에서 위치한 유

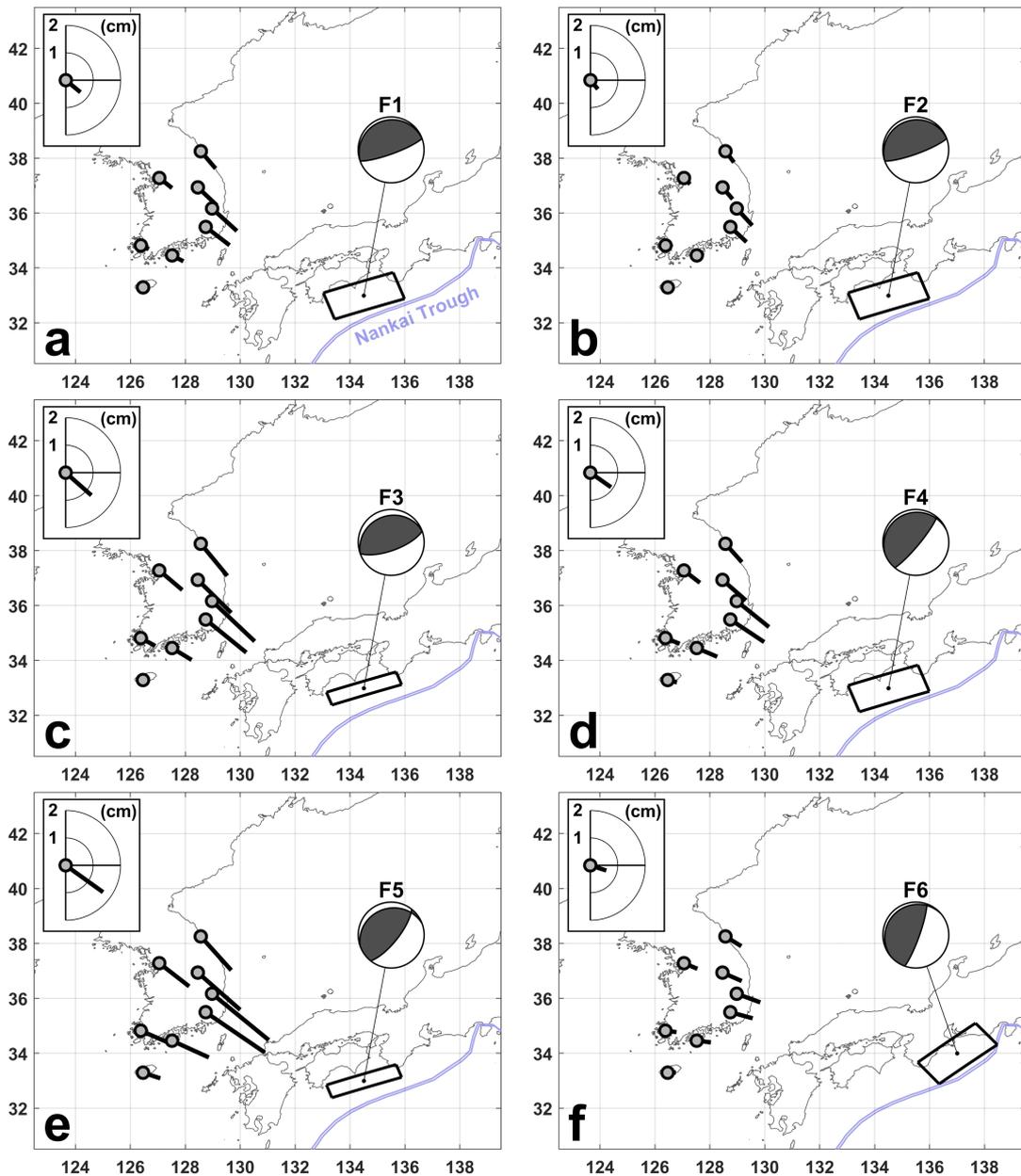


Fig. 4. Co-seismic horizontal surface motion due to the six fault models from F1 to F6 listed in Table 1, predicted at the positions of 8 GNSS stations on the Korean Peninsula. The mean vector is indicated by the thick black line in the box in the upper-left corner. The blue double line indicates the boundary of the Nankai Trough based on the plate model of Bird (2003), and the horizontal projection of the fault plane is shown as the black rectangle.

한 단층 모델 F6에 의한 효과를 나타낸 것이며, 위치와 주향을 제외하고 모델 F4와 모든 조건이 같다. 그림 3d와 3f를 비교해 보면, 토난카이 구역의 단층면이 한반도 변위에 미치는 효과는 상대적으로 더 먼 진앙거리의 영향으로 인해 비교적 작은 편임을 알 수 있다. 특히 선행 연구에서 조사된 이 구역의 지진 모멘트는 본 계산에서 가정된 값(Mw 8.5)보다 작은 경우가 많아(Kikuchi *et al.*, 2003; Baba *et al.*, 2006; Furumura *et al.*, 2011) 이전에 발생한 토난카이 구역의 지진 규모를 답습한다고 할 때, 이로 인한 한반도의 수평 변위는 제시된 양상보다 더욱 작아질 것으로 예상된다.

3.2. 난카이 해곡 주변 유한 단층 모델에 의한 한반도 후지진 수평 변위

앞서 2.4절에서 설명하였듯이, 단층에서 발생한 응력은

연약권에 전달되어, 연약권의 점탄성 조건에 따라 시간을 두고 후지진 변형을 나타낸다. 이때 전달된 응력이 클수록 더욱 뚜렷한 후지진 변형 양상을 보이고, 응력의 크기는 동지진 변형의 대소로서 가능할 수 있다. 따라서 모든 단층에 대한 점탄성 반응의 계산 결과를 제시하기보다, 동지진 변형이 가장 작았던 단층 F2와 가장 컸던 단층 F5에 의한 두 점탄성 모델의 후지진 변형의 범위를 알아봄으로써 후지진 변화의 최소 및 최대 기대 범위를 제시하고자 한다.

그림 5는 두 개의 유한 단층 모델 F2와 F5에 의해 지진이 발생하였을 때, 연약권이 V1 또는 V2를 따르는 점탄성 구조일 경우를 가정한 4개 조합의 50년에 걸친 후지진 변형을 나타낸 것이다. 그림 5a에서 5h까지의 후지진 변화에서, 시점 0에서의 변위는 앞선 그림 4b와 4e에 제시된 각 지점에서의 동지진 변위를 포함하고 있으며, 이어지는 시간

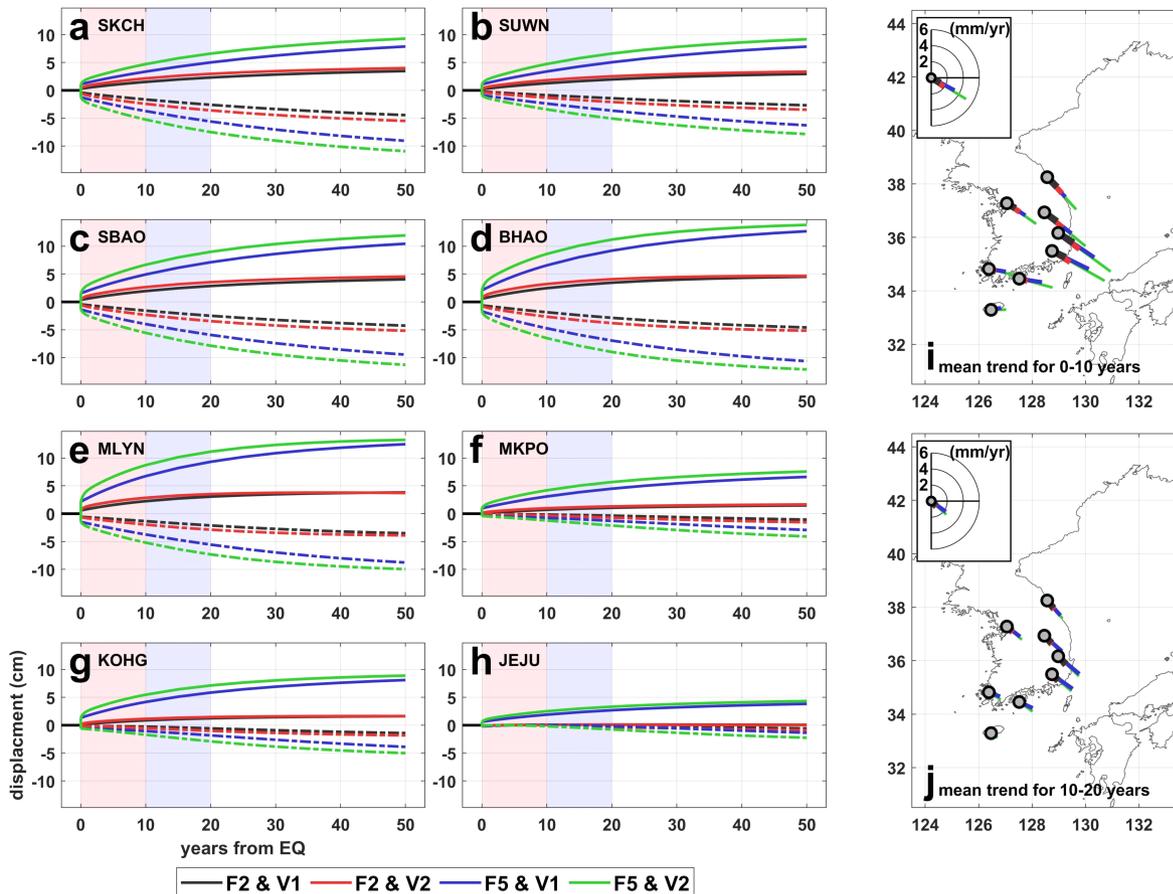


Fig. 5. Time-dependent horizontal surface motion considering the post-seismic effects due to different fault slip models and asthenosphere viscosities. (a-h) Predicted surface displacements at the position of 8 GNSS stations on the Korean Peninsula, estimated for 50 years after the faulting of fault model F2 and F5 considering the delayed motion due to asthenosphere model V1 and V2. The co-seismic displacement is included. The solid curve indicates the eastward component, and the dashed-dotted curve shows the northward component. (i) Mean linear trend examined for $0 < t < 10$ years, for the period indicated by the bright red box in panel a-h. (j) Mean linear trend for $10 < t < 20$ years, indicated as the bright blue box in panel a-h. In all panels, the black lines are from fault model F2 and asthenosphere condition V1, and the red lines show the results considering F2 and V2. The blue and green lines indicate the responses due to fault model F5, but considers different asthenosphere models, V1 and V2, respectively.

에 따른 변형 양상이 점탄성 모델에 의한 후지진 변위를 나타낸다. 실선은 동서 성분, 1점 쇄선은 남북 성분을 의미하며, 후지진 변위 역시 시간에 따라 진원이 위치하는 남동 방향으로 움직임이 진행된다는 것을 보여준다. 검은 선은 응력이 가장 약했던 F2 단층과 점성이 상대적으로 높은 V1 연약권 모델을 가정한 것으로서, 맨틀에 전달된 응력과 점성에 의한 반응성이 둘 다 낮아 가장 낮은 후지진 변형도를 보여준다. 연두색 선은 가장 높은 변위를 보였던 F5 단층과 낮은 점성을 갖는 V2 연약권을 상정한 것으로서, 비교적 큰 응력에 대해 민감하게 반응하는 가장 급격한 후지진 변형을 보여준다.

그림 5i와 5j는 지진 직후부터 10년간(연한 빨간 영역)과 지진 이후 10년부터 20년까지(연한 파란 영역)의 평균 속도를 선형으로 근사한 벡터를 표시한 것이다. 1-D 모델의 한계점인 수평적인 물성 배열의 불확실성 때문에 실제 변위의 구체적인 방향은 제시된 방향보다 다소 달라질 가능성이 있으나, 진원이 위치한 남동 방향으로의 후지진 변형 경향성은 유의할 만한 특징이다. 그림 5a에서 5h까지의 시간 변화에서 확인할 수 있듯 후지진 변형으로 인해 누적되는 변위는 지진 직후 발생한 동지진 변위만큼 나타나는 데에 수 년이 채 걸리지 않을 정도로 크지만, 그 이후에는 급격하게 느려지는 양상으로서 나타난다. 하지만 Mw 8.5의 난카이 구역 지진 단층에 의해 촉발되는 후지진 변위의 평균적인 속도 벡터는 한반도 각 위치에서의 평균적인 판 이동 속도(약 3 cm/yr, 그림 1i)에 비하면 대체로 작은 편임을 알 수 있다(그림 5i와 5j). 하지만 가장 강한 변형을 보였던 유한 단층 모델 F5에 3×10^{18} Pa s의 맥스웰 점성을 갖는 연약권 모델 V2의 조합을 고려할 경우, 단층 발생 직후 10년 이내에 보이는 평균 속도는 BHAO 및 MLYN 관측소에서 가장 뚜렷한 속도인 약 0.8 cm/yr로 예측되어 한반도 평균 판 이동 속도의 4분의 1 정도에 해당하는 속도 편차를 추가할 것으로 보인다.

4. 결론 및 논의

본 연구에서는 1-D 지체 구조를 가정하여 과거 난카이 해곡 주변에서 발생한 대지진들의 선행 연구를 참고하여 단층 변수의 범위를 설정하고, 이에 따른 다양한 동지진 및 후지진 변위 예측 시나리오를 검토하였다. 지진 단층의 규모를 Mw 8.5로 통일하고 경사 10-20°, 중심 깊이 15-20 km, 슬립의 각도 90-120° 범위를 고려한 여러 유한 단층 모델을 시험한 결과, 고려된 범위 내에서 단층의 경사가 급할수록, 진원이 깊어질수록, 또 우수향 성분이 포함된 역단층이 발생할 경우 한반도의 변위가 최대로 나타나는 경향성을 확인하였다. 고려된 변수 범위 내에서 가장 급격한 동

지진 효과를 나타내는 조합만을 고려하면 한반도의 동지진 수평 변위는 Mw 8.5의 난카이 구역 지진원을 상정하여도 2011년 동일본 대지진의 관측 결과와 유사한 수준으로 나타나는 것으로 예측되었다. 연약권의 1차원 점탄성 모델에 따른 후지진 변형 효과 또한 선행 연구에서 논의되었던 조건인 맥스웰 점성 3×10^{18} Pa s의 값을 인용할 경우, 지진 직후 10년간 한반도 평균 판 이동 속도의 최대 25% 가량의 후지진 속도를 추가할 수 있을 것으로 예측되었다.

설명한 모델 예측 결과는 몇 가지의 변수가 달라질 경우 그 즉지적 응답 양상이 상당히 민감하게 달라질 수 있다는 것을 보여준다. 예를 들어, 한반도에 미치는 영향이 가장 큰 조합(단층 F5)에서 한두 조건만 만족하지 않더라도 예상 동지진 변위는 상당히 줄어들게 되는데, 고려된 조건의 범위에서는 단층면의 경사가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다. 대륙판과 해양판의 접촉면에서 대지진이 발생하는 경우를 고려한다면 필리핀 해 판의 섭입 각도에 가까운 경사 10° 정도의 단층면이 좀더 가능성이 높을 것으로 생각되지만, 시코쿠 섬 남단에서의 섭입 각도에 비해 키이 반도 하부에는 이보다 비교적 급한 섭입각이 나타나고 있어 이에 따른 불확실성도 존재한다. 또한 과거 1707년의 호에이 대지진의 유한 단층 모델 연구에 우수향 운동 성분이 섞인 역단층이 공통적으로 고려되는 사실을 고려하면, 한반도 방향으로 단층 운동의 방향이 편향된 대지진의 발생 가능성 또한 충분하다고 생각된다. 이 경우, 면선각 90°의 역단층에 비해 120°의 기울어진 역단층이 한반도의 수평 변위를 20-30% 가량 증가시키는 것으로 모의되었다.

이러한 변수 조건들을 종합해 볼 때, 난카이 구역에서 대지진이 발생한다고 가정할 때 그 지진 단층의 기하학적 조건은 단층 F5와 F4 사이로 예상되며, 후지진 반응은 연약권 모델 V2에 가깝게 나타날 것으로 생각된다. 각각의 경우에 대해 계산된 결과는 표 3에 정리하였으며, 두 모델의 예측값 범위로부터 Mw 8.5의 지진이 유사한 형태로 난카이 구역에서 발생한다고 가정했을 때의 예상 변위를 가능해 볼 수 있다.

앞서 언급했듯이, 동일한 기하학적 조건을 유지한 단층면에 규모가 다른 지진의 효과는 지진 모멘트의 비율만큼 변위장을 선형으로 늘리거나 줄여서 이해할 수 있다. 현재 모의된 변위의 크기는 Mw 8.5의 규모를 가정한 약 6.3×10^{21} N m의 지진 모멘트에 의한 것으로, 같은 조건에서 1946년 난카이 지진과 유사한 Mw 8.3 전후의 지진이 발생한다고 가정할 때 지진 모멘트는 약 3.2×10^{21} N m로 절반이 되며, 예상되는 변위량 또한 표 3에서 제시된 값의 절반으로서 예상할 수 있다. 반대로 이보다 큰 모멘트를 가진 Mw 9.0의 지진(약 3.5×10^{22} N m)에 의한 즉지 효과는 제시된 값보다 5.6배 증가한 값으로서 가능할 수 있다. 예를

Table 3. Co- and post-seismic horizontal displacements estimated at the locations of 8 GNSS stations on the Korean Peninsula. The estimates are provided as the eastward (E) and northward (N) components, and the magnitude of the vector (Mag.). The values shown above and below each cell represent the lower and upper bounds of the estimates based on the Mw 8.5 finite fault model F4 and F5 shown in Table 1, respectively. The post-seismic trends are based on the asthenosphere model V2 in Table 2.

	Co-seismic horizontal motion (mm)			Post-seismic trend for 0-10 years (mm/yr)		
	E	N	Mag.	E	N	Mag.
SKCH (38.251°N 128.565°E)	6.0 11.1	-6.7 -12.3	9.0 16.6	2.1 3.6	-2.3 -4.0	3.1 5.4
SUWN (37.276°N 127.054°E)	5.8 10.9	-4.5 -8.4	7.4 13.8	2.1 3.6	-1.5 -2.6	2.5 4.5
SBAO (36.934°N 128.457°E)	8.6 15.4	-7.5 -13.6	11.4 20.5	2.9 5.1	-2.4 -4.2	3.7 6.6
BHAO (36.164°N 128.976°E)	11.8 20.7	-9.5 -16.9	15.1 26.7	3.6 6.5	-2.6 -4.8	4.5 8.1
MLYN (35.491°N 128.744°E)	12.3 21.5	-8.2 -14.7	14.8 26.1	3.5 6.6	-2.0 -3.7	4.1 7.5
MKPO (34.817°N 126.381°E)	5.2 9.7	-2.1 -4.2	5.6 10.6	1.8 3.2	-0.5 -0.8	1.9 3.3
KOHG (34.454°N 127.519°E)	7.5 13.4	-3.2 -6.1	8.1 14.7	2.3 4.1	-0.6 -1.1	2.4 4.3
JEJU (33.288°N 126.462°E)	3.4 6.3	-0.9 -2.1	3.5 6.6	1.1 1.9	-0.0 -0.0	1.1 1.9

들어 단층 F5가 Mw 9.0의 지진을 일으킬 경우를 가정한다면 MLYN 관측소에서 예상되는 동지진 수평 변위의 크기는 현재 모의된 값인 2.6 cm에서 5.6배 증가하여 거의 15 cm에 달하게 된다. 비교적 온건한 가정인 모델 F4의 경우에도 규모가 Mw 9.0으로 확대될 경우 경남 지방 일대에 8 cm 내외의 변위가 예측된다. 따라서 2011년 동일본 대지진에 준하는 규모의 거대 지진이 난카이 해곡 근방에서 발생할 경우 우리나라는 20세기부터 이어진 측지 관측 기간 중 최대의 순간 변위를 경험하게 될 것으로 보인다. 이와 같은 지진 모멘트 비율에 따른 배율 적용은 후지진 변위에도 동일하게 적용할 수 있으며, 마찬가지로 Mw 9.0의 지진을 가정할 경우 지진 직후 10년간의 후지진 유발 속도는 연간 수 mm 수준인 현재의 모의 결과(표 3)에서 연간 수 cm 수준으로 눈에 띄게 증가할 것으로 예상된다. 다만 본 예측에 사용된 연약권 모델 V2의 탄성 두께 및 점성(Jeon *et al.*, 2023)은 2011년 동일본 대지진의 후지진 효과로부터 추정된 것임을 유의할 필요가 있다. 1-D 모델의 한계 상 해당 값은 진앙에서 관측 지점까지의 공간에 걸친 물성 구조가 평균되어 반영된 것인데, 여기에는 섭입판의 존재는 물론, 동해 지각의 두께 차이 등과 같은 뚜렷한 이질성이 만드는 효과가 모두 개입되어 있다. 이에 반해 난카이 구역과 한반도 사이는 대륙붕으로 연결되어 있으므로 그 양상이 동해의 이질성이 포함된 추정인 연약권 모델 V2와는 다른 형태로 나타날 가능성이 있다. 따라서 실제 지진이 발생한 이후 관측되는 후지진 효과의 속도가 V2 모델을 기반한 예측과

다를 경우도 충분히 생각해 볼 수 있으며, 오히려 그러한 차이는 일본 남부와 대한해협, 한반도에 이르는 평균적인 연약권 점성 구조를 더욱 정확하게 추정하는 기회가 될 것으로 기대한다.

1-D 모델을 이용한 역단층 유발 수평 변위장을 살펴보면, 관측 지점과 진앙 사이의 상대적 위치가 변위의 크기를 결정하는 주된 요소로 나타난다. 예를 들어, 진앙거리가 가까울수록 변위의 크기가 커지고, 동일한 진앙거리일 경우에는 단층 운동 축선의 연장선상에서 최대 변위가, 축선에 직각인 지점에서 (거의 0에 가까운) 최소 변위가 산출된다. 지난 2011년 동일본 대지진의 경우 진앙에 대해 우리나라 GNSS 관측소는 약 1,200 km에서 1,500 km 범위의 거리에 분포하면서, 각 지점에서 진앙을 향하는 방향선과 최대 변위 축선(약 N20°W 방향)이 이루는 각도 편차가 상대적으로 크지 않아 관측된 동지진 변위의 크기는 주로 진앙 거리에 의해 결정되는 양상이 뚜렷하였다(Hong *et al.*, 2015). 하지만 난카이 구역 지진원에 대해서는 우리나라가 보다 가까워진 500 km에서 900 km 정도의 진앙거리에 놓이게 되면서 각 지점이 축선과 이루는 각도의 편차가 더욱 커지게 되어 이 또한 중요한 변수가 될 것으로 보인다. 앞서 그림 4에 제시된 모의 결과에서도 난카이 구역 예상 지진원으로부터 비슷한 진앙거리(~750 km)를 갖는 속초(SKCH)와 제주(JEJU) 관측소에서의 예상 변위가 일관되게 큰 차이를 보인다는 점 또한 이러한 상대적 위치 차이가 중요하게 개입된 결과로 해석된다. 결과적으로 난카이 대지진이 발생

할 경우, 단층 운동의 예상 축선에서 비교적 큰 각도로 벗어나 있을 것으로 예상되는 우리나라 남서부와, 축선에 근접한 경상도 및 강원도의 변위 크기에서 큰 차이가 예상된다. 이렇게 동서 양단에서 극명하게 달라지는 변위장의 모습으로 미루어 볼 때, 난카이 대지진의 동지진 응력장은 한반도에 일종의 북서-남동 방향의 전단력으로서 작용할 가능성이 높아 보인다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 세종과학펠로우십(2022R1C1C200658613)과 해양수산과학기술진흥원(RS-2023-00256677; PM23030)의 지원으로 작성되었습니다. 또한 본 논문의 완성도를 더욱 높일 수 있도록 도움을 주신 익명의 심사위원 두 분과 편집위원께 감사드립니다.

REFERENCES

- Ando, M., 1975, Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the nankai trough, Japan. *Tectonophysics*, 27, 119-140, [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(75\)90102-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(75)90102-X).
- Baba, T., Cummins, P.R., Hori, T. and Kaneda, Y., 2006, High precision slip distribution of the 1944 Tonankai earthquake inferred from tsunami waveforms: Possible slip on a splay fault. *Tectonophysics*, 426, 119-134, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.02.015>.
- Back, J., Shin, Y.-H., Na, S.-H., Shestakov, N.V., Park, P.-H. and Cho, S., 2012, Coseismic and postseismic crustal deformations of the Korean Peninsula caused by the 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake, Japan, from global positioning system data. *Terra Nova*, 24, 295-300, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2012.01062.x>.
- Banerjee, P., Pollitz, F., Nagarajan, B. and Bürgmann, R., 2007, Coseismic Slip Distributions of the 26 December 2004 Sumatra-Andaman and 28 March 2005 Nias Earthquakes from gps Static Offsets. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, S86-S102, <https://doi.org/10.1785/0120050609>.
- Bird, P., 2003, An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4, <https://doi.org/10.1029/2001GC000252>.
- Blewitt, G., Hammond, W. and Kreemer, C., 2018, Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science. *Eos*, 99, <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>.
- Chesley, C., LaFemina, P.C., Puskas, C. and Kobayashi, D., 2012, The 1707 Mw8.7 Hiei earthquake triggered the largest historical eruption of Mt. Fuji. *Geophysical Research Letters*, 39, <https://doi.org/10.1029/2012GL053868>.
- Dogliani, C., Ismail-Zadeh, A., Panza, G. and Riguzzi, F., 2011, Lithosphere-asthenosphere viscosity contrast and decoupling. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 189, 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2011.09.006>.
- Dziewonski, A.M. and Anderson, D.L., 1981, Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25, 297-356, [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7).
- Fitch, T.J. and Scholz, C.H., 1971, Mechanism of underthrusting in southwest Japan: A model of convergent plate interactions. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 76, 7260-7292, <https://doi.org/10.1029/JB076i029p07260>.
- Furumura, T., Imai, K. and Maeda, T., 2011, A revised tsunami source model for the 1707 Hiei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116, <https://doi.org/10.1029/2010JB007918>.
- Han, S.-C., Sauber, J. and Pollitz, F., 2014, Broadscale postseismic gravity change following the 2011 Tohoku-Oki earthquake and implication for deformation by viscoelastic relaxation and afterslip. *Geophysical Research Letters*, 41, 5797-5805, <https://doi.org/10.1002/2014GL060905>.
- Han, S.-C., Sauber, J. and Pollitz, F., 2016, Postseismic gravity change after the 2006-2007 great earthquake doublet and constraints on the asthenosphere structure in the central Kuril Islands. *Geophysical Research Letters*, 43, 3169-3177, [10.1002/2016GL068167](https://doi.org/10.1002/2016GL068167).
- Han, S.-C., Sauber, J. and Riva, R., 2011, Contribution of satellite gravimetry to understanding seismic source processes of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophysical Research Letters*, 38, <https://doi.org/10.1029/2011GL049975>.
- Hirahara, K., Kato, N., Miyatake, T., Hori, T., Hyodo, M., Mitsui, N., Wada, Y., Miyamura, T., Nakama, Y. and Kanai, T., 2004, Simulation of Earthquake Generation Process in a Complex System of Faults. Earth Simulator Center, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan.
- Hong, T.-K., Lee, J. and Hough, S.E., 2015, Long-term evolution of intraplate seismicity in stress shadows after a megathrust. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 245, 59-70, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2015.05.009>.
- Hyndman, R.D., Wang, K. and Yamano, M., 1995, Thermal constraints on the seismogenic portion of the southwestern Japan subduction thrust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100, 15373-15392, <https://doi.org/10.1029/95JB00153>.
- Hyodo, M., Hori, T. and Kaneda, Y., 2016, A possible scenario for earlier occurrence of the next Nankai earthquake due to triggering by an earthquake at Hyuga-nada, off southwest Japan. *Earth, Planets and Space*, 68, 6, <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0384-6>.
- Jeon, T., Seo, K.-W. and Han, S.-C., 2023, Impact of the solid Earth mass adjustment by the 2011 Tohoku-Oki earthquake on the regional sea level and hydrological mass change recovery from GRACE. *Geophysical Journal International*, 235, 1373-1383, <https://doi.org/10.1093/gji/ggad307>.
- Kanamori, H., 1972, Tectonic implications of the 1944 Tonankai and the 1946 Nankaido earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 5, 129-139, [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(72\)90082-9](https://doi.org/10.1016/0031-9201(72)90082-9).
- Kikuchi, M., Nakamura, M. and Yoshikawa, K., 2003, Source rupture processes of the 1944 Tonankai earthquake and the 1945 Mikawa earthquake derived from low-gain seismograms. *Earth, Planets and Space*, 55, 159-172, <https://doi.org/10.1186/BF>

- 03351745.
- Kim, H.U., Hwang, E.-H., Lee, H. and Lee, D.K., 2020, A Study on the Analysis of Crust Deformation on the Korean Peninsula after the Tohoku Earthquake using GNSS Observation. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 38, 689-696 (in Korean with English Abstract). <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2020.38.6.689>.
- Kim, S., Ree, J.-H., Yoon, H.S., Choi, B.-K. and Park, P.-H., 2018, Crustal Deformation of South Korea After the Tohoku-Oki Earthquake: Deformation Heterogeneity and Seismic Activity. *Tectonics*, 37, 2389-2403, <https://doi.org/10.1029/2018TC004967>.
- Kodaira, S., Takahashi, N., Nakanishi, A., Miura, S. and Kaneda, Y., 2000, Subducted Seamount Imaged in the Rupture Zone of the 1946 Nankaido Earthquake. *Science*, 289, 104-106, <https://doi.org/10.1126/science.289.5476.104>.
- Levitt, D.A. and Sandwell, D.T., 1995, Lithospheric bending at subduction zones based on depth soundings and satellite gravity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100, 379-400, <https://doi.org/10.1029/94JB02468>.
- Murotani, S., Shimazaki, K. and Koketsu, K., 2015, Rupture process of the 1946 Nankai earthquake estimated using seismic waveforms and geodetic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 5677-5692, <https://doi.org/10.1002/2014JB011676>.
- Nakata, R., Hyodo, M. and Hori, T., 2014, Possible slip history scenarios for the Hyuga-nada region and Bungo Channel and their relationship with Nankai earthquakes in southwest Japan based on numerical simulations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 4787-4801, <https://doi.org/10.1002/2014JB010942>.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 1135-1154, <https://doi.org/10.1785/BSSA0750041135>.
- Okubo, S., 1992, Gravity and potential changes due to shear and tensile faults in a half-space. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97, 7137-7144, <https://doi.org/10.1029/92JB00178>.
- Pollitz, F.F., 1996, Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical earth. *Geophysical Journal International*, 125, 1-14, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x>.
- Pollitz, F.F., 1997, Gravitational viscoelastic postseismic relaxation on a layered spherical Earth. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102, 17921-17941, [doi:10.1029/97JB01277](https://doi.org/10.1029/97JB01277).
- Pollitz, F.F., 2019, Lithosphere and shallow asthenosphere rheology from observations of post-earthquake relaxation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 293, 106271, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.106271>.
- Saito, T., Baba, T., Inazu, D., Takemura, S. and Fukuyama, E., 2019, Synthesizing sea surface height change including seismic waves and tsunami using a dynamic rupture scenario of anticipated Nankai trough earthquakes. *Tectonophysics*, 769, 228166, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.228166>.
- Saxena, A., Dannberg, J., Gassmüller, R., Fraters, M., Heister, T. and Styron, R., 2023, High-Resolution Mantle Flow Models Reveal Importance of Plate Boundary Geometry and Slab Pull Forces on Generating Tectonic Plate Motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128, e2022JB025877, <https://doi.org/10.1029/2022JB025877>.
- Shao, G., Li, X., Ji, C. and Maeda, T., 2011, Focal mechanism and slip history of the 2011 Mw 9.1 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, constrained with teleseismic body and surface waves. *Earth, Planets and Space*, 63, 559-564, <https://doi.org/10.5047/eps.2011.06.028>.
- Song, S.G. and Lee, H., 2018, Static Slip Model of the 2017 Mw 5.4 Pohang, South Korea, Earthquake Constrained by the InSAR Data. *Seismological Research Letters*, 90, 140-148, <https://doi.org/10.1785/0220180156>.
- Steinberger, B. and Calderwood, A.R., 2006, Models of large-scale viscous flow in the Earth's mantle with constraints from mineral physics and surface observations. *Geophysical Journal International*, 167, 1461-1481, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03131.x>.
- Tanaka, Y., Hasegawa, T., Tsuruoka, H., Klemann, V. and Martinec, Z., 2015, Spectral-finite element approach to post-seismic relaxation in a spherical compressible Earth: application to gravity changes due to the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Geophysical Journal International*, 200, 299-321, <https://doi.org/10.1093/gji/ggu391>.
- Tapley, B.D., *et al.*, 2019, Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature Climate Change*, 9, 358-369, <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0456-2>.
- Tobita, M., 2016, Combined logarithmic and exponential function model for fitting postseismic GNSS time series after 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Earth, Planets and Space*, 68, 41, <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0422-4>.