

<Review>

유사동역학 지진원 모델링, 현황과 전망

송석구[‡] · 박은진

한국지질자원연구원 지질재해연구본부

Pseudo-dynamic earthquake source modeling, current status and prospect

Seok Goo Song[‡] · Eunjin Park

Geologic Hazards Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

요 약

물리적 지진모델링 기반 강지진동 지진파형 모사 연구는 미래 발생 가능한 시나리오 지진모델에 대해서 근거리 강지진동 특성을 이해하고 예측하여 지진재해를 평가하기 위해 필수적이며 우리나라와 같이 관측 강지진동 자료가 부족한 지역에서는 그 중요성이 더 크다. 기존에는 경험론적 지진동 예측식이나 추계학적 지진동 모사 방법을 주로 사용하였으나 최근에는 지진단층의 역학적 파열과정과 지진파 전파 과정을 모두 고려한 단층지진원 기반 강지진동 모사 방법이 주목받고 있다. 강지진동 모사의 기반이 되는 지진단층 파열 모델링은 주로 동역학 및 유사동역학 방법이 사용되는데 본 연구에서는 계산 효율성으로 직접적인 활용도가 높을 것으로 기대되는 유사동역학 지진원 모델링의 연구 동향 및 전망에 대해 서술하였다. 실효성 있는 적용을 위해서는 모델의 입력값 개선, 확률모델의 복잡성 고려, 고주파 대역으로의 확장 등 해결해야 할 과제들이 있지만 기존의 경험론적 지진동 예측식이나 추계학적 모사 방법의 한계를 극복할 수 있는 기술로 각광받고 있다. 관측 강지진동 자료가 절대적으로 부족한 국내 지진환경에서 고도화된 지진재해 평가 연구를 수행하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

주요어: 지진재해, 단층지진원, 유사동역학 지진원 모델링, 강지진동 모사

ABSTRACT: Physics-based ground motion prediction studies are an essential element for advanced seismic hazard assessment. They make it possible to understand and predict the characteristics of near-source strong ground-motions from future scenario earthquake models, which makes its importance greater in regions where observational data are scarce. Empirical Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) or stochastic strong ground-motion simulation methods have been mainly used in the community, but recently, strong ground-motion simulation approaches with fault-based earthquake source are becoming more attractive. They consider both the mechanical rupture process of an earthquake fault and the seismic wave propagation by adopting either dynamic or pseudo-dynamic earthquake source modeling. In this review, we stated the research trends and prospects of the pseudo-dynamic source modeling, which are expected to be more usable because of their computational efficiency. Although there are still challenges to be overcome, such as improving the input values of pseudo-dynamic source models, upgrading the complexity of the probabilistic model, and extending to high-frequency band (> 1 Hz), this method may overcome the limitations of the empirical GMPEs or stochastic simulation methods. We expect that it will greatly contribute to conducting advanced seismic hazard assessment and mitigation studies in the Korean Peninsula where observational strong ground-motion data are absolutely lacking.

Key words: seismic hazard, fault-based earthquake source, pseudo-dynamic source modeling, strong ground motion simulation

[‡]Corresponding author: +82-42-868-3019, E-mail: sgsong@kigam.re.kr

1. 서론

2016년과 2017년에 동남권에서 연이어 발생한 M_L 5.8 경주지진과 M_L 5.4 포항지진은 우리나라가 지진 안전지대가 아니며 지진재해 평가 및 경감을 위한 체계적인 연구 필요성을 인식하는 계기가 되었다. 경주, 포항지진 발생 이후 동남권 지역에 조밀한 지진관측망을 설치하여 미소지진 활동을 정밀 관측하고 고지진 지표파열 등의 연구를 통해 이 지역에서 미래 강진 발생 가능성을 분석하는 등 고도화된 지진재해 평가를 위한 범정부적인 연구활동이 진행되고 있다. 본 리뷰에서는 미래에 발생 가능성이 있는 시나리오 지진모델에 대해서 지진원 인근 거거리 강지진동 특성을 이해하고 예측하여 고도화된 지진재해 평가를 수행하기 위한 물리적 지진모델링 기반 강지진동 지진파형 모사 연구를 소개하고 그 현황과 전망을 논의하고자 한다.

지진단층에서 강진 발생 시 인근 관측지점에서 예상되는 강지진동의 특성을 예측하는 것은 지진재해 평가 연구에서 중요한 요소이다. 과거 발생 지진들에 대한 관측 지진동 자료를 활용하여 규모와 거리에 따른 지진동의 세기를 예측하는 경험론적 지진동 예측식(empirical Ground Motion Prediction Equations, GMPEs)이 오랜 기간 사용되어 왔다(Abrahamson *et al.*, 2008). 그러나 관측 자료에 기반을 둔 접근법은 미국 캘리포니아주와 일본 열도와 같이 강진 발생 빈도가 높은 지역에서도 규모가 큰 지진이나 거리가 가까운 지역에 대해서는 관측 자료의 부족으로 신뢰성 있는 예측식 개발에 어려움이 있고 관측 강지진동 자료가 절대적으로 부족한 우리나라와 같은 경우에는 적용하기가 거의 불가능하다. 대신 이런 지역의 경우 규모가 상대적으로 작은 미소지진에 의한 관측 자료를 활용하여 지역에 특화된 응력강하량과 감쇄특성을 결정한 후 추계학적 지진동 모사 방법(Boore, 1983, 2003)을 활용하여 강지진동을 모사한다. 그리고 모사된 합성지진파형 자료를 활용하여 지진동 예측식을 구축하는 접근법이 주로 활용되어왔다(Jo and Baag, 2001; Park *et al.*, 2001). 그러나 이 방법의 경우에도 규모가 작은 지진들은 상대적으로 단주기 대역의 자료를 포함하기 때문에 규모가 큰 지진의 장주기 대역 지진동의 예측 신뢰성을 확보하는데는 어려움이 있을 수 있다. 특히 위 두가지 접근법

은 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA), 최대지반속도(Peak Ground Velocity, PGV), 스펙트럼 가속도(Spectral Acceleration, SA)와 같이 전체 지진파형의 특성을 대표하는 스칼라 값을 예측하거나 최대 지진동을 포함하는 단일 Phase, 단일 성분을 모사하기 때문에 삼성분 전체 지진파형을 활용한 고도화된 지진재해 평가 연구에는 충분한 정보를 제공할 수 없는 한계가 있다.

최근에는 지진단층의 근접 지역, 즉 단층 파열 길이에 준하는 수준의 진앙 거리에서 강지진동 지진파형의 특성을 정확하게 모사하기 위한 단층지진원 기반 강지진동 모사 방법이 주목을 받고 있다. 동역학, 유사동역학 지진단층 파열 모델링 기반 강지진동 지진파형 모사 연구가 주류를 이루고 있는데 지진단층의 역학적 파열과정과 지진파 전파 과정을 모두 고려하여 삼성분 지진파형을 모사하는 방법으로 지진단층 근접 지역에서 예상되는 강지진동의 삼성분 전체 지진파형을 정확하게 모사함으로써 고도화된 지진재해 평가 연구에 활용도가 높을 것으로 기대되고 있는 분야이다. 본 리뷰에서는 계산 효율성으로 다량의 강지진동 지진파형 DB를 구축할 수 있어 물리적 지진모델링 기반 강지진동 모사 연구에 직접적인 활용도가 높을 것으로 기대되는 유사동역학 지진원 모델링 연구 동향 및 해결 과제 등을 고찰해 보고자 한다. 유사동역학 지진원 모델링의 경우 수십에서 수백개의 시나리오 지진원 모델에 대한 강지진동 지진파형 모사 및 분석 연구가 용이하게 수행될 수 있으나 동역학 지진원 모델링의 경우 두 자리수의 지진원 모델을 구축하기 위해서는 슈퍼 컴퓨터를 사용하는 등 상당 수준의 계산 자원을 필요로 하는 경우가 많다.

2. 유사동역학 지진원 모델링

관측 지점에서 예상되는 강지진동의 세기는 지진의 규모와 지진원과 관측지점 사이의 거리,부지효과 등의 영향을 받게 된다(그림 1). 그러나 지진단층 인근 지역에서는 단순히 지진의 규모와 거리 영향 뿐만 아니라 지진단층의 물리적 파열 과정이 강지진동의 특성에 큰 영향을 줄 수 있어 점지진원이 아닌 단층지진원을 활용하여 단층파열의 역학적 현상을 세밀하게 분석할 필요가 있다. 국내 지진 연구의 경우 주로

규모 5.0 이하의 중소규모 지진에 대해서 점지진원 특성을 분석하는 연구가 주류를 이루었으나 경우, 포항 지진 발생 이후 근거리 지진동 자료나 인공위성 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 자료 등을 활용하여 단층지진원 모델을 구축하는 연구가 수행된 바 있다(Uchide and Song, 2018; Song and Lee, 2019). 단층지진원 기반 근거리 강지진동 특성 연구에서는 단층면에 작용하는 응력과 단층파열 과정에서 단층면에 작용하는 마찰력의 변화 특성을 고려한 동역학 지진모델링(Dynamic Earthquake Rupture Modeling) 방법이 선도적으로 사용되고 있다(Olsen *et al.*, 2009; Shi and Day, 2013). 그러나 동역학 지진모델링은 단층 파열의 역학적 특성에 기반을 두고 근거리 강지진동 특성을 분석할 수 있는 강점이 있지만 관측 자료에 의해서 결정된 입력 동역학 변수를 설정하기 어려운 점이 있고 무엇보다 계산용량 과다로 강지진동 특성의 통계적 분석을 위한 다량의 지진파형을 생산하는 데 한계가 있다.

유사동역학 지진원 모델링(Pseudo-dynamic Earthquake Source Modeling) 연구는 운동학적(kinematic) 지진 모델링 방법의 계산 효율성과 동역학 지진모델의 물리적 특성을 결합하여 최적의 단층지진원 모델을 구축하려는 취지로 시도되었다(그림 2; Guatteri *et al.*, 2004; Graves and Pitarka, 2010). 주로 단층변위(slip), 단층변위속도(slip velocity), 단층파열속도(rupture

velocity) 등 주요 운동학적 지진원 변수 사이의 관계식을 다량의 동역학 지진원 모델을 분석함으로써 도출하는 방식이다. 지진원 변수 사이의 관계식에는 불확실성이 어느 정도 포함될 수밖에 없고 결정론적인 관계식을 사용하는 경우 실제 동역학 지진원 모델 보다 지진원 변수 사이에 너무 경직된 관계를 적용하는 결과를 초래할 수 있는 우려가 있어 이후에는 지진원 변수 사이에 어느 정도의 불확실성을 고려하는 통계적인 상관계수를 활용하는 방법이 시도되었다(Liu *et al.*, 2006; Schmedes *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2014). 특히 Song *et al.* (2014)의 경우 주요 지진원 변수 사이의 상관계수를 단층면 상에서 같은 위치뿐만 아니라 그 주변 영역까지 포함하여 유사동역학 지진원 모델링에서 보다 강력한 상관 특성을 고려할 수 있는 발판을 마련하였다. Song 모델의 이론적 배경과 모델링 방법론은 각각 Song and Dalguer (2013)의 그림 4와 Song *et al.* (2014)의 부록에서 참고할 수 있다.

미국 남캘리포니아 지진센터(Southern California Earthquake Center, SCEC)에서는 지진재해 평가와 경감을 위한 체계적인 연구를 위해서 다양한 프로젝트를 수행하고 있는데 광대역 강지진동 모사 플랫폼(Broadband Platform, BBP) 구축 사업도 그 중 하나이다(Maechling *et al.*, 2015). BBP 사업에서는 물리적 지진모델링 기반 광대역(0 - 20+ Hz) 강지진

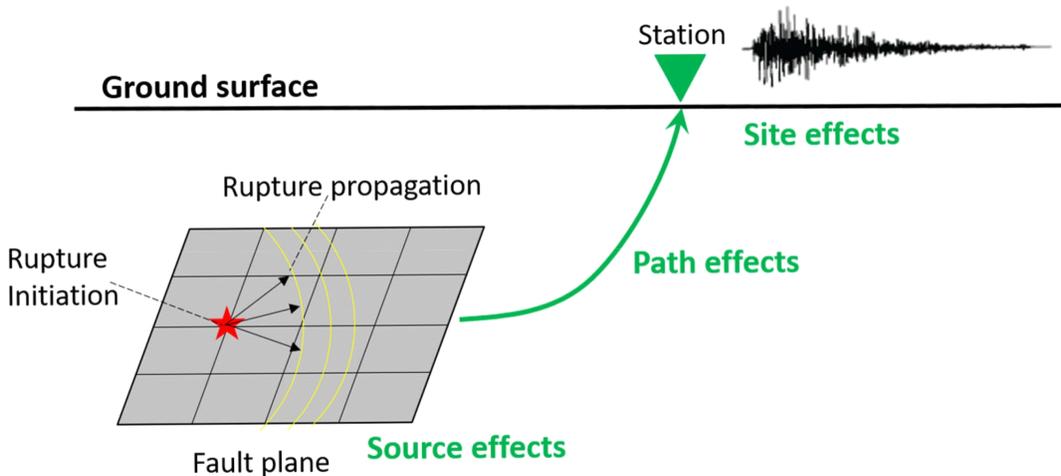


Fig. 1. A schematic diagram that shows the generation of ground motions. Ground motions are affected by all three components, i.e., source, path, and site. In the near-source region, the source effect may be dominant.

동 모사 플랫폼을 구축하여 다양한 지진재해 평가 및 경감 연구에 활용한다는 목표를 갖고 있다. 지진 및 지진공학 연구자를 포함하여 국제적으로 복수의 연구 그룹이 참여하고 있으며 객관적이고 검증된 플랫폼 구축을 위하여 과거 지진동 자료 및 경험론적 지진동 예측식과 비교 분석 등 다양한 활동을 진행하고 있다(Dreger *et al.*, 2015; Goulet *et al.*, 2015). 또한 주기적으로 성능 개선 작업을 수행하여 최신 버전을 일반에 공개하고 있다(<http://github.com/SCEC/code/bbp>). 광대역 강지진동 모사 플랫폼을 구축하기 위해서는 지진원, 지진파 전파, 부지효과를 모사할 수 있는 독립적인 모듈이 필요한데 본 리뷰에서 다루고 있는 지진원 모듈을 고려하면 현재 미국 모듈 2개(GP, UCSB), 한국 모듈 1개(Song), 일본 모듈 1개(Irikura)가 SCEC BBP에 장착되어 있는 상태이다. 주요 운동학적 지진원 변수(단층변위, 단층변위속도, 단층파열 속도 등)의 1점 및 2점 통계량을 사용하는 한국의 Song 모델은 다양한 조건에서 구축된 360개 동역학 지진모델군(Dalguer and Mai, 2012)을 분석하여 일반화된 유사동역학 입력모델을 구축하여 사용하고 있다(Song, 2016).

SCEC BBP는 지진 및 지진공학 연구자들에 의해서 고도화된 지진재해 평가 및 경감을 위한 다양한 연구활동에 활용되고 있다(Bijelic *et al.*, 2019; Oreb

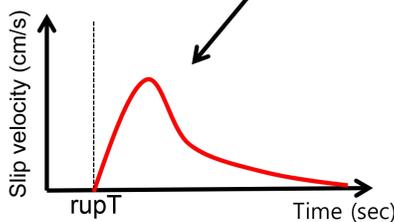
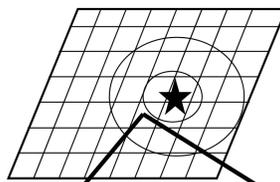
et al., 2019; Zhong *et al.*, 2021). 특히 국내 지진재해 평가의 경우 역사지진 자료가 중요하게 활용되고 있는데 역사지진 자료의 불확실성을 검증하기 위한 기초 연구 등에도 활용된 바 있다(Kim *et al.*, 2019; An *et al.*, 2020). Song 모델의 경우에도 단층지진원에 의한 근거리 강지진동 특성을 파악하거나(Fayjaloun *et al.*, 2020; Park *et al.*, 2020) 한반도에서 중대규모 시나리오 지진모델을 활용한 삼차원 지진파 전파 모델링 연구 등에 활용된 바 있다(Lee *et al.*, 2022). 특히 강지진동 특성은 강지진동의 세기를 나타내는 주요 변수(PGA, PGV, SA)들의 통계분포, 즉 평균, 표준편차, 주기별 상관계수 등으로 정량화되어 분석되는 경우가 많은데(Bayless and Abrahamson, 2018; Bayless and Abrahamson, 2019a, 2019b), 주요 지진원 변수들의 1점/2점 통계량을 사용하는 유사동역학 지진원 모델링의 경우 지진원 변수와 지진동 변수 사이의 통계적 상관 관계 분석 연구에 상당한 잠재력이 있을 것으로 기대되고 있으며 현재 그 기초 연구들이 시도되고 있다(Crempien and Archuleta, 2017; Song *et al.*, 2021).

3. 해결과제와 전망

물리적 지진모델링 기반 강지진동 모사 기술의 핵

Kinematics

- $u(x,t)$
- slip
- rupture time
- slip velocity
- slip duration



Dynamics

- $T(x,t)$
- initial stress (τ_0)
- shear strength (τ_s)
- final stress (τ_f)
- friction laws (slip-weakening)

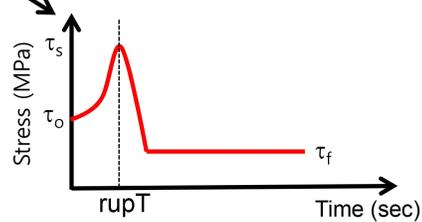


Fig. 2. Kinematic vs. dynamic representation of an earthquake source. The kinematics is focused on motion on the fault while the dynamics on force, i.e., stress and friction. The pseudo-dynamic source modeling is a kinematic approach, but constrained by the dynamics.

심 요소라고 할 수 있는 유사동역학 지진원 모델링은 성능기반 지진공학(Performance Based Earthquake Engineering, PBEE) 분야와 맞물려 고도화된 지진 재해 평가 정보를 제공할 수 있는 기술로 각광받을 것으로 기대되고 있으나 실효성 있는 적용을 위해서는 해결해야 할 과제들도 상당수 존재한다. 우선 다양한 조건에서 동역학 지진모델을 분석하여 유사동역학 모델의 입력 값을 개선할 필요가 있다. 현재 구축된 Song 모델(Song, 2016)의 경우에도 분석대상 동역학 지진원 모델의 규모 범위(M 6.5-7.0)의 제약이 있어 특히 우리나라와 같이 규모 6.5 이하의 중 규모 지진 발생 가능성이 높은 지역에서는 보다 작은 규모의 지진에 대한 유사동역학 모델 개발이 필요할 것으로 보인다. 유사동역학 지진원 모델링을 적용할 수 있는 규모의 하한이나 상한이 정해져 있는 것은 아니지만 해당 규모 범위에 대해서 동역학 지진원 모델을 구축하고 유사동역학 지진원 모델의 특성을 추출해야 하는 것은 유사동역학 지진원 모델의 활용성을 제약하는 측면이 있다. 또한 다량의 동역학 지진모델군을 구축하기 위해서는 슈퍼컴퓨터의 활용 등 상당량의 계산자원을 필요로 하기 때문에 다양한 조건에서 충분한 양의 동역학 지진모델군을 구축하는 것도 주요 과제 중 하나이다. 특히 단층변위 분포모델에서 도출이 가능한 응력강하량에 비해서 상대적으로 관측자료를 이용한 특성 이해에 어려움이 있는 단층파열에너지(Fracture energy)가(Guatteri and Spudich, 2000) 유사동역학 지진원 모델에 미치는 영향을 이해하는 것은 중요한 과제이다(Song, 2015). 유사동역학 모델의 입력 모델을 구축하기 위하여 관측 지진자료에 의해서 결정된 운동학적 지진 모델(Mai and Thingbaijam, 2014)을 사용하는 방법도 생각해 볼 수 있지만(Song *et al.*, 2009), 단층변위(slip) 모델 정도를 제외하고는 변수사이의 상관관계를 추출할 수 있을 정도의 정확도를 기대하기 어렵다. 다만 관측 지진동 자료로부터 유사동역학 지진원 모델의 1점/2점 통계량 변수를 바로 결정하는 방법은 역산 과정에서 불확실성이 상당 수준 포함될 수 있는 주요 운동학적 지진원 변수의 단층면 상에서의 분포모델을 직접 결정하지 않아도 되기 때문에 고려해 볼 필요가 있다. 추가적으로 경험론적 지진동 예측식(e.g., Bayless and Abrahamson, 2019a, 2019b)을 만족하는 유사동역학 입력 모델을 역산을

통해서 결정하는 접근법도 생각해 볼 수 있다.

입력모델 개선 작업과 함께 추가적으로 유사동역학 확률모델의 복잡성(Complexity)을 증가시켜 좀 더 실제 상황에 가까운 모델을 구축할 필요가 있다. 예를 들어 현재까지는 주요 지진원 변수를 나타내는 확률변수가 단층면 상에서 동일한 통계적 특성을 갖는 정상성(stationarity)을 갖고 있다고 가정하고 확률 모델을 구축하였지만 단층의 각 지점이 위치한 깊이 에 따라서 온도, 압력 조건의 변화에 따른 단층 주변 매질의 물성의 변화가 있을 수 있고 단층 파열의 시작(nucleation), 전파(propagation), 종료(termination) 단계에 따른 역학적 특성 변화도 충분히 예상해 볼 수 있다. Dhanya and Raghukanth (2020)는 단층변위의 비정상성을 고려하여 단층변위를 Trend part와 Fluctuation part로 분리하여 강지진동 모사를 수행하였는데 Trend 모델을 대표하는 Irikura 모델(Irikura and Miyake, 2011)과 fluctuation 모델을 대표하는 GP 모델(Graves and Pitarka, 2010)을 혼합하여 하이브리드 모델을 구축하는 연구도 시도되고 있다(Pitarka *et al.*, 2017, 2020). 다만 모델의 복잡성을 증가시키는 것은 그만큼 결정해야 하는 입력모델의 자유도가 증가하여 적정 수준의 최적 조건을 도출하는 것도 주요한 과제이다. 추가적으로 현재 정규 분포(Normal Distribution)를 가정하고 있는 1점 통계량 분포도 좀 더 현실적인 비정규 분포로 변환할 필요도 있어 보인다(Thingbaijam and Mai, 2016). 마지막으로 다분절 모델이나 단층면 기하구조의 불균질성을 고려한 모델로의 확장도 생각해 볼 수 있다(Graves and Pitarka, 2016).

물리적 지진모델링 기반 강지진동 모사는 여전히 저주파 대역에 머물러 있는 경향이 있는데 전통적인 경계인 1 Hz의 벽을 넘어 한계 주파수를 상향시키는 노력이 필요하다고 생각한다. 현재 SCEC BBP에 장착된 모듈들의 경우에도 1 Hz를 기준으로 저주파는 유사동역학 지진원 모델링을 사용하고 고주파 대역은 추계학적 지진동 모사 방법(Boore, 2003; Atkinson and Assatourians, 2015)을 사용하는 것이 주류이고 UCSB 모델의 경우만 저주파와 고주파 대역 모두에 대해서 유사동역학 모델을 사용하는데 여전히 고주파 대역에서 만족할 만한 성과를 도출하는데 어려움을 겪고 있다. 그러나 궁극적으로는 고주파 대역에 대해서도 물리적 지진모델링 기반 강지진동 모사 방

법을 적용하는 것이 필요하다고 생각되며 동역학 지진원 모델링의 경우 일부 선도적인 연구 사례들이 소개되고 있다(Shi and Day, 2013). 마지막으로 중요하게 고려해야 할 점은 개발된 강지진동 모사 플랫폼의 신뢰성을 어떻게 검증하느냐 하는 문제인데 현재에도 과거 지진에 의한 관측 지진동 자료나 경험론적 지진동 예측식과 비교 분석을 통하여 검증 작업을 수행하고 있지만(Dreger *et al.*, 2015; Goulet *et al.*, 2015) 대부분 관측자료가 상대적으로 밀집한 중규모($M \sim 6.5$) 지진이나 거리 구간($30 \text{ km} \sim 50 \text{ km}$)에서 주로 진행되고 있으며 관측 지진동 자료가 부족한 대규모 지진($M > 7.0$)이나 근거리($\sim 10 \text{ km}$) 지역에서는 마땅한 검증 방법이 부재한 측면도 있다.

물리적 지진모델링 기반 강지진동 모사 플랫폼 구축과 그 핵심 요소 기술 중 하나인 유사동역학 지진원 모델링 기술은 삼성분 전체 지진파형을 활용한 고도화된 지진재해 평가와 성능기반 지진공학 연구 동향과 맞물려 앞으로 그 활용도가 계속 증가할 것으로 기대된다. 일례로 미국 캘리포니아에서 수행중인 Cybershake 프로젝트는 경험적 지진동 예측식을 사용하지 않고 실제 삼차원 단층 파열 및 지진파 전파 모델링을 통해서 지진재해를 평가하는 선도적인 연구를 시도하기도 하였다(Graves *et al.*, 2011). 국내에서도 경주, 포항지진 이후 고지진 지표파열 특성 연구를 통하여 제4기 이후 운동한 흔적인 있는 단층구조선 조사 연구를 수행하고 있는데 규모 6.0 이상의 강진을 발생시킬 수 있는 지진단층이 발견된다면 대상 단층에 대해서 시나리오 지진모델을 설정하고 유사동역학 지진원 모델링을 통하여 관심지점에서 예상되는 강지진동 지진파형의 특성을 이해하고 예측하는 연구 수행이 가능할 것으로 기대된다.

4. 결론

본 리뷰에서는 물리적 지진모델링 기반 강지진동 모사 및 특성 예측 연구에서 핵심 요소 기술 중 하나인 유사동역학 지진원 모델링 연구의 현황과 전망을 고찰해 보았다. 강지진동 특성 예측 연구는 지진재해 평가 및 경감 연구에서 중요한 위치를 차지하는 핵심 분야이며 최근에는 경험론적 지진동 예측식이나 추계학적 모사 방법의 한계를 극복할 수 있는 물리적 지진모델링 기반 강지진동 모사 및 특성 연구

가 미국, 일본 등 주요 지진재해 연구 선진국을 중심으로 활발하게 수행되고 있다. 우리나라에서도 경주, 포항 지진 발생을 계기로 체계적인 지진재해 평가 및 경감을 위한 범정부적인 노력이 진행되고 있다. 유사동역학 지진원 모델링을 중심으로 하는 물리적 지진모델링 기반 강지진동 모사 및 특성 예측 연구는 관측 강지진동 자료가 절대적으로 부족한 국내 지진환경에서 고도화된 지진재해 평가 연구를 수행하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 논문은 한국지질자원연구원 기본사업(동남권 단층지진원 기반 강지진동 예측 및 지역특화 지진조기경보 기술개발, GP2020-027)의 지원으로 작성되었습니다.

REFERENCES

- Abrahamson, N., Atkinson, G., Boore, D., Bozorgniz, Y., Campbell, K., Chiou, B., Idriss, I.M., Silva, W. and Youngs, R., 2008, Comparisons of the NGA ground-motion relations. *Earthquake Spectra*, 24, 45-66.
- An, S.H., Kyung, J.B., Song, S.G. and Cho, H.-I., 2020, Analysis of intensity attenuation characteristics using physics-based earthquake ground-motion simulation with site effect in the southern Korean Peninsula. *Journal of Korean Earth Science Society*, 41, 238-247.
- Atkinson, G.M. and Assatourians, K., 2015, Implementation and validation of EXSIM (A stochastic finite-fault ground-motion simulation algorithm) on the SCEC broadband platform. *Seismological Research Letters*, 86, 48-60.
- Bayless, J. and Abrahamson, N.A., 2018, Evaluation of the interperiod correlation of ground-motion simulations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108, 3413-3430.
- Bayless, J. and Abrahamson, N.A., 2019a, An empirical model for the interfrequency correlation of epsilon for Fourier amplitude spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109, 1058-1070.
- Bayless, J. and Abrahamson, N.A., 2019b, Summary of the BA18 ground-motion model for Fourier amplitude spectra for crustal earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109, 2088-2105.
- Bijelic, N., Lin, T. and Deierlein, G.G., 2019, Evaluation of building collapse risk and drift demands by nonlinear structural analyses using conventional hazard analysis

- versus direct simulation with Cybershake seismograms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109, 1812-1828.
- Boore, D.M., 1983, Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73, 1865-1894.
- Boore, D.M., 2003, Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, 160, 635-676.
- Crempien, J.G.F. and Archuleta, R.J., 2017, Within-event and between-events ground motion variability from earthquake rupture scenarios. *Pure and Applied Geophysics*, 174, 3451-3465.
- Dalguer, L.A. and Mai, P.M., 2012, Prediction of near-source ground motion exceeding 1g at low frequencies (<2 Hz) from Mw ~6.5 deterministic physics-based dynamic rupture simulations. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering (15 WCEE)*, Lisbon, Portugal.
- Dhanya, J. and Raghukanth, S.T.G., 2020, A non-stationary random field model for earthquake slip. *Journal of Seismology*, 24, 423-441.
- Dreger, D.S., Beroza, G.C., Day, S.M., Goulet, C.A., Jordan, T.H., Spudich, P.A. and Steward, J.P., 2015, Validation of the SCEC broadband platform V14.3 simulation methods using pseudospectral acceleration data. *Seismological Research Letters*, 86, 39-47, doi:10.1785/0220140118.
- Fayjaloun, R., Causse, M., Cornou, C., Voisin, C. and Song, S.G., 2020, Sensitivity of high-frequency ground motion to kinematic source parameters. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 1947-1967.
- Goulet, C.A., Abrahamson, N.A., Somerville, P.G. and Wooddell, K.E., 2015, The SCEC broadband platform validation exercise: methodology for code validation in the context of seismic-hazard analyses. *Seismological Research Letters*, 86, 17-26, doi:10.1785/0220140104.
- Graves, R., Jordan, T.H., Callaghan, S., Deelman, E., Field, E., Juve, G., Kesselman, C., Maechling, P., Mehta, G., Milner, K., Okaya, D., Small, P. and Vahi, K., 2011, Cybershake: A physics-based seismic hazard model for southern California. *Pure and Applied Geophysics*, 168, 367-381.
- Graves, R.W. and Pitarka, A., 2010, Broadband ground-motion simulation using a hybrid approach. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, 2095-2123.
- Graves, R.W. and Pitarka, A., 2016, Kinematic ground-motion simulations on rough faults, including effects of 3D stochastic velocity perturbations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106, 2136-2153.
- Guatteri, M., Mai, P.M. and Beroza, G.C., 2004, A pseudo-dynamic approximation to dynamic rupture models for strong ground motion prediction. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94, 2051-2063.
- Guatteri, M. and Spudich, P., 2000, What can strong-motion data tell us about slip-weakening fault-friction laws?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 98-116.
- Irikura, K. and Miyake, H., 2011, Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios. *Pure and Applied Geophysics*, 168, 85-104.
- Jo, N.D. and Baag, C.E., 2001, Stochastic prediction of strong ground motions in southern Korea. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 5, 17-26 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.K., Song, S.G. and Kyung, J.B., 2019, An analysis of intensity attenuation characteristics by physics-based strong ground-motion simulation. *Journal of Korean Earth Science Society*, 40, 56-67 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., Song, J.-H., Kim, S., Rhie, J. and Song, S.G., 2022, Three-dimensional seismic-wave propagation simulations in the southern Korean Peninsula using pseudo-dynamic rupture models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 112, 939-960.
- Liu, P.C., Archuleta, R.J. and Hartzell, S.H., 2006, Prediction of broadband ground-motion time histories: hybrid low/high-frequency method with correlated random source parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 2118-2130.
- Maechling, P.J., Silva, F., Callaghan, S. and Jordan, T.H., 2015, SCEC broadband platform: system architecture and software implementation. *Seismological Research Letters*, 86, 27-38, doi:10.1785/0220140125.
- Mai, P.M. and Thingbaijam, K.K.S., 2014, SRCMOD: An online database of finite-fault rupture models. *Seismological Research Letters*, 85, 1348-1357.
- Olsen, K.B., Day, S.M., Dalguer, L.A., Mayhew, J., Cui, Y., Zhu, J., Cruz-Atienza, V.M., Roten, D., Maechling, P., Jordan, T.H., Okaya, D. and Chourasia, A., 2009, ShakeOut-D: Ground motion estimates using an ensemble of large earthquakes on the southern San Andreas fault with spontaneous rupture propagation. *Geophysical Research Letters*, 36, L04303, doi:10.1029/2008GL036832.
- Oreb, J., Novak, M.Š. and Bijelić, N., 2019, Validation of the SCEC Broadband Platform Simulations for Bridge Seismic Demand Assessment. *2nd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure*, 23-26 June, 2019, Chania, Greece.
- Park, D.H., Lee, J.M., Baag, C.E. and Kim, J.K., 2001, Stochastic prediction of strong ground motions and attenuation equations in the southeastern Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 37, 21-30 (in Korean with English abstract).
- Park, D.H., Song, S.G. and Rhie, J., 2020, Sensitivity anal-

- ysis of near-source ground motions to pseudo-dynamic source models derived with 1-point and 2-point statistics of earthquake source parameters. *Journal of Seismology*, 24, 397-422.
- Pitarka, A., Graves, R.W., Irikura, K., Miyake, H. and Rodgers, A., 2017, Performance of Irikura recipe rupture model generator in earthquake ground motion simulations with Graves and Pitarka hybrid approach. *Pure and Applied Geophysics*, 174, 3537-3555.
- Pitarka, A., Graves, R.W., Irikura, K., Miyakoshi, K. and Rodgers, A., 2020, Kinematic rupture modeling of ground motion from the M7 Kumamoto, Japan, earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 2199-2221.
- Schmedes, J., Archuleta, R.J. and Lavallee, D., 2013, A kinematic rupture model generator incorporating spatial interdependency of earthquake source parameters. *Geophysical Journal International*, 192, 1116-1131.
- Shi, Z. and Day, S.M., 2013, Rupture dynamics and ground motion from 3-D rough-fault simulations. *Journal of Geophysical Research*, 118, 1122-1141.
- Song, S.G., 2015, The effect of fracture energy on earthquake source correlation statistics. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105, 1042-1048.
- Song, S.G., 2016, Developing a generalized pseudo-dynamic source model of Mw 6.5-7.0 to simulate strong ground motions. *Geophysical Journal International*, 204, 1254-1265.
- Song, S.G., Causse, M. and Bayless, J., 2021, Sensitivity analysis of the interfrequency correlation of synthetic ground motions to pseudo-dynamic source models. *Seismological Research Letters*, 92, 301-313.
- Song, S.G. and Dalguer, L.A., 2013, Importance of 1-point statistics in earthquake source modeling for ground motion simulation. *Geophysical Journal International*, 192, 1255-1270.
- Song, S.G., Dalguer, L.A. and Mai, P.M., 2014, Pseudo-dynamic source modeling with 1-point and 2-point statistics of earthquake source parameters. *Geophysical Journal International*, 196, 1770-1786.
- Song, S.G. and Lee, H., 2019, Static slip model of the 2017 Mw 5.4 Pohang, South Korea, earthquake constrained by the InSAR data. *Seismological Research Letters*, 90, 140-148.
- Song, S.G., Pitarka, A. and Somerville, P., 2009, Exploring spatial coherence between earthquake source parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99, 2564-2571.
- Thingbaijam, K.K.S. and Mai, P.M., 2016, Evidence for truncated exponential probability distribution of earthquake slip. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106, 1802-1816.
- Uchide, T. and Song, S.G., 2018, Fault rupture model of the 2016 Gyeongju, South Korea, earthquake and its implication for the underground fault system. *Geophysical Research Letters*, 45, 2257-2264.
- Zhong, K., Lin, T., Deierlein, G.G., Graves, R.W., Silva, F. and Luco, N., 2021, Tall building performance-based seismic design using SCEC broadband platform site-specific ground motion simulations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 50, 81-98.

Received : October 7, 2022

Revised : November 18, 2022

Accepted : November 20, 2022