

ISSN 0435-4036 (Print) ISSN 2288-7377 (Online)

## 2017 포항지진 액상화에 의한 모래화산의 발달 특성 및 고지진학적 접근

이호일<sup>1</sup> · 김진철<sup>2,‡</sup> · 고경태<sup>3</sup> · 김용식<sup>1</sup> · 김지성<sup>2</sup> · 이승렬<sup>1</sup> <sup>1</sup>한국지질자원연구원 국토지질연구본부 <sup>2</sup>한국지질자원연구원 지질환경연구본부 <sup>3</sup>한국지질자원연구원 전략기술연구본부

#### 요 약

2017년 11월 15일 경상북도 포항시 흥해읍 일원에 발생한 M<sub>L</sub> 5.4의 지진으로 진앙지와 인접한 지역에 광범 위한 모래화산이 다수 관측되었다. 이번 연구에서는 액상화 현상에 의해 지표로 분출된 모래의 이동과정 및 지 하의 액상화 구간을 추적하기 위하여 미고결 퇴적층을 대상으로 트렌치 조사를 실시하였다. 연구지역의 미고결 퇴적층은 하부에 모래질이 우세한 반면, 상부에는 점토질이 우세한 특징을 보이며 범람원 환경으로 해석된다. 이번 지진으로 인해 액상화된 모래는 실트질 점토층의 불규칙한 균열면을 따라 주입되어 지표로 분출된 것으로 확인되었다. 입도분석 결과, 분출된 모래화산은 200~300 μm의 최빈값을 보여주는 미고결 퇴적층의 해발 고도 2.4~3.0 m 구간과 유사한 입도 분포를 보여준다. 이 구간에서 확인된 연질퇴적변형구조를 고려하면 고도 2.6~3.0 m 구간에서 모래화산이 기원된 것으로 판단된다. 한편, 고도 2.53 m 부근에서 현저한 입도 차이를 보 이는 렌즈상의 조립질 모래층은 과거 지진에 의해 액상화된 모래가 주입되었을 것으로 추정된다. 따라서 렌즈 상의 조립질 모래층 상하위층에서 각각 산출된 탄소연대와 액상화가 발생할 수 있는 최소 지진 규모를 바탕으 로 AD 1360~1640년 시기에 규모 5이상의 지진이 발생했던 것으로 추정된다. 이러한 결과는 포항지역을 포함 하는 한반도 동남부 일대 고지진 연구에 기초적인 자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

주요어: 포항지진, 액상화, 모래화산, 고지진학

#### Hoil Lee, Jin Cheul Kim, Kyoungtae Ko, Yong Sik Ghim, Jisung Kim and Seung Ryeol Lee, 2018, Characteristics of sand volcanoes caused by 2017 Pohang Earthquake-induced liquefaction and their paleoseismological approach. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 3, p. 221-235

**ABSTRACT:** A large number of sand volcanoes were observed in the vicinity of the epicenter due to the  $M_L$  5.4 earthquake occurred on November 15, 2017 in Heunghae area, Pohang City. In this study, trench investigations were carried out on unconsolidated sediments to trace the vertical migration of the sand volcanoes and the liquefaction zone under the surface. The examined sections are markedly dominated by muddy sediments in the upper part, sandy sediments in the lower part, which have been deposited in a floodplain. The liquefied sand was injected along the irregular cracks of the silty clay layer at the upper part of the trench. The sand volcanoes show a similar grain size distribution to the sediments at the altitudes of 2.4-3.0 m showing the mode of 200-300  $\mu$ m. Considering the development of the soft-sediment deformation structure in this section, the sand volcano is considered to have been originated at the altitude of 2.6-3.0 m. The lenticular coarse-grained sand layer showing a remarkable difference in particle size at the altitude of 2.5 m is likely to have been injected from lower liquefied sand by paleo-earthquake event in this area. Therefore, it is considered that M>5 earthquake occurred during AD 1360-1640 based on the radiocarbon dating from the upper and lower layers of the lenticular coarse-grained sand layer. This result could be basic data to trace paleo-earthquake in the southeastern part of Korea.

Key words: 2017 Pohang Earthquake, liquefaction, sand volcano, paleoseismology

(Hoil Lee, Yong Sik Ghim and Seung Ryeol Lee, Geological Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Jin Cheul Kim and Jisung Kim, Geologic Environment Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Kyoungtae Ko, Strategic Technology Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

<sup>\*</sup> Corresponding author: +82-42-868-3137, E-mail: kjc76@kigam.re.kr

## 1. 서 론

일반적으로 자연재해로 인한 피해는 광범위한 지 역에 영향을 주며 다양한 원인을 가진다(Yoo et al., 2011; Song and Kim, 2013). 특히 자연재해 중 지진 은 다른 자연재해에 비해 현재까지는 예측이 불가능 해 경제적 피해 뿐 만 아니라 인명 피해를 다수 유발 시킨다. 전세계적으로 지진활동이 활발히 일어나는 지역에서는 지진을 예측하기 위해 단층감시시스템을 이 용하여 단층 거동특성평가 연구에 활용하고 있으며 최근 국내에서도 이를 도입하여 운영 중에 있다(Cho et al., 2012). 그러나 이러한 노력에도 불구하고 재해 예방 측면에서는 아직까지 큰 도움을 주지 못하고 있는 실정이다. 지진을 예측하는 방법 중 하나는 지 진의 재발주기를 계산하여 향후 발생할 지진의 시기 및 규모를 예측하는 것이다. 그러나 과거의 지진 관 측기록은 약 2천년 정도로 국한되어 있으며 이러한 역사지진 기록은 지진 감진에 대한 진도(intensity) 로만 변환될 수 있어 정확한 규모(magnitude)를 추 정하는데 한계가 있다. 본격적으로 지진계를 설치하 여 지진을 기록하기 시작한 기간도 100여년 정도 밖 에 되지 않아 수십에서 수백 년 또는 수천 년 이상의 긴 재발주기를 보여주는 지진을 예측하기에는 어려움 이 따른다(Kim et al., 2017). 따라서 장주기 지진과 최 대지진 규모의 규명을 위해서는 역사시대 이전에 발생 한 고지진(Paleo-earthquakes)의 연구와 함께 지난 2000년간 발생한 역사지진(Historical earthquakes) 을 비교·평가하는 것이 매우 중요하다(McCalpin and Nelson, 2009; Kim et al., 2017).

2016년 9월 경상북도 경주시 내남면 일원에 M<sub>L</sub> 5.1 및 5.8의 지진이 발생하였다. 이들 중 M<sub>L</sub> 5.8의 지진 은 계기지진 관측사상 최대 규모였다. 이로 인해 한 반도 동남부 일대에는 인명 및 재산피해가 다수 발 생하였으며, 비록 한반도가 판 내부에 위치하나 지 진에 대한 안전지대가 아님을 시사함과 동시에 지진 에 대한 국민들의 불안과 관심이 증폭된 사례가 되 었다. 이로부터 약 1년 후인 2017년 11월 15일 경주 와 인접한 경상북도 포항시 흥해읍 일원에 M<sub>L</sub> 5.4 의 강력한 지진이 다시 발생하였다. 2017 포항지진 의 특징은 2016 경주지진과는 달리 진앙지와 인접한 지역에 진앙지로부터 3 km 이내의 지역에서 모래화 산이 다수 관측되었다는 점이다. 지진 발생시 지표에서 관찰할 수 있는 모래화산(sand volcano)은 모래분출물(sand blow)로도 불리며, 화 산형상과 같이 원뿔의 모양에 분출구에서는 함몰된 형 태를 가진다. 모래화산은 지진에 의해 유발된 액상화 에 기인하여 생성된 연질퇴적변형구조(soft-sediment deformation structure)의 한 종류이며, 단면상에서는 수직으로 관입한 쇄설성 암맥(clastic dyke)으로 관 찰되는 것이 일반적이다(Sims, 1973; Seilacher, 1984; Van Loon *et al.*, 1995; Kyung and Okada, 1995; Rodríguez-Pascua *et al.*, 2000, 2015; Guccione, 2005; Cox *et al.*, 2007; Obermeier, 2009). 과거 지진을 연 구하는데 다양한 연질퇴적변형구조의 파악은 매우 중요한 역할을 할 수 있다.

고지진과 관련한 국내에서의 연질퇴적변형구조에 관한 연구는 많이 부족한 편이지만, 최근들어 비교적 늘고 있는 추세이다(Kang et al., 2010; Lee et al., 2010, 2014; Ko et al., 2015, 2017). Lee et al. (2014) 은 포항시 남구 도구리 일원에 분포하는 신생대 제4 기 후기 플라이스토세 퇴적층에서 액상화에 의한 연 질퇴적변형구조를 보고하였으며 약 80 ka에 규모 5 이상의 지진이 있었음을 제시한 바가 있다. 이는 지 금까지 국내에 보고된 지진과 관련한 연질퇴적변형 구조 연구들 중 가장 신기에 해당하는 시기로 2017 포항지진으로 발생한 액상화 및 고지진학적 연구에 중요한 자료가 될 수 있다.

이번 연구에서는 2017 포항지진에 의해 발생한 액 상화 모래의 이동 과정 및 지하의 액상화 구간의 규 명을 위하여 포항시 흥해읍 일원의 미고화 퇴적층을 대상으로 트렌치 조사를 실시하였다. 또한 트렌치 과 정 중 이번 지진이 아닌 과거 액상화에 의한 모래화 산 기록이 추가로 확인됨에 따라 고지진학적 측면에 서 해석을 시도하였다.

### 2. 연구지역 및 연구방법

포항시는 한반도 남동부에 속하며 동해안에 접하고 있다(그림 1). 2017 포항지진의 진앙지는 흥해읍 남송리 지역으로 포항시의 북쪽에 위치한다. 흥해 지 역은 남쪽을 제외하고는 대부분 산지로 둘러싸여 있 다. 흥해 지역에서 가장 큰 하천은 동-서 방향으로 흐 르는 곡강천으로 흥해 지역 남쪽으로부터 유입되는 초곡천과 합류하여 동해로 흐른다. 흥해 지역은 일부 도심지를 제외하고 현재 대부분 경작지로 활용되고 있다. 2006년 및 2015년에 수행된 골재자원조사에 의하면, 흥해 지역 미고결 퇴적층 상 부는 실트와 점토질 퇴적층이 주로 분포하며 하부는 모래 내지 모래질 자갈층 또는 자갈질 모래층이 우세 하게 분포한다(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2006; Korea Water Resources Corporation, 2015) (그림 2).

이번 포항지진에서 관찰되는 모래화산은 서로 다 른 분출구가 선형으로 연속되며 발달한다. 따라서 트 렌치 대상 지점은 모래화산이 북동-남서 방향으로 약 60 m 길이로 발달한 지점을 선정하였다. 모래화산의 주입경로를 파악하기 위해 모래화산의 분포방향과 같 은 방향으로 15 m 길이와 3 m 깊이로 굴착하였다.



Fig. 1. Aerial photographs of the trench site and borehole locations of the aggregate resource survey performed in 2006 and 2015.

굴착과정 중 지하수위는 모래가 출현하는 심도 약 1.4 m에서 확인되었으며, 강제 배수를 통해 모래층의 단 면을 확보하였다.

퇴적층의 형성시기를 분석하기 위하여 한국지질자원 연구원의 가속질량분석기(accelerator mass spectrometer, AMS)를 이용하여 방사성탄소연대(<sup>14</sup>C)측정을 실시 하였다. 방사성탄소연대측정을 위한 시료는 목편으로 산-염기-산(AAA) 화학처리를 통해 오염물을 제거 한 후 분석용 흑연을 추출하였다. 본 연구에 적용된 모든 탄소 연대의 보정은 Oxcal을 이용하였고 2σ 오 차 범위를 활용하였다(http://c14.arch.ox.ac.uk).

퇴적층의 입도 분석은 교란층으로 판단되는 최상부 붉은색 실트질 점토층을 제외하고 10 cm (가로) × 25 cm (세로) × 5 cm (두께) 크기의 박스 샘플러를 제작 하여 2 개의 퇴적단면에서 각각 75 cm (단면 1), 25 cm (단면 2) 길이의 주상 시료를 획득하였다. 획득된 시 료는 실내에서 각각 5 cm 및 3 cm 간격으로 입도분 석을 위한 시료를 추출하였다. 또한 지표로 분출된 모 래에 대해서도 입도분석을 실시하였다. 건조된 시료 300 mg을 24시간 동안 35% 과산화수소를 이용하여 유 기물을 제거한 뒤, 1 N 염산을 2시간 동안 2회 반응 시켜 탄산염 및 철산화물을 제거하였다. 이후 증류수 를 이용하여 3회 세척한 뒤, 초음파세척기에 30초 동 안 입자들을 분해하였다. 입도분석에는 Mastersizer 3000 (Malvern Instruments Ltd., UK) 장비를 사용 하였다.

#### 3. 연구결과

#### 3.1 퇴적상 분석

트렌치 조사를 통해 약 2.5 m 깊이의 퇴적층이 확 인되었다(그림 3). 연구지역의 퇴적층은 하부에는 모래질이 우세하며 상부에는 점토질이 우세한 퇴적 층으로 크게 구분되며, 아래와 같이 4개의 퇴적상으 로 세분되었다(그림 4).

#### 3.1.1 실트질 점토층(silty mud)

이 퇴적상은 주로 최상부에 약 1.2 m 내외로 두껍 게 관찰된다. 주로 붉은색을 띠며, 하부에는 탄화된 식물편이 관찰된다. 층 내부에 퇴적구조가 관찰되지



**Fig. 2.** Stratigraphic sections of the aggregate resource survey performed in 2006 and 2015 around Heunghae area (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2006; Korea Water Resources Corporation, 2015).

걸룩대가 불 가 하부의 모래보다 상대적으로 두껍게 관찰된다. 청회색을 띠며 상향 세립화의 경향은 이 퇴적층이

범람원의 배후습지 환경에서 퇴적되었음을 지시한 다. 또한 상대적으로 하부의 모래보다 상부의 점토 가두꺼운 것은 습지환경이 우세했던 것으로 여겨진다.

## 3.1.3 모래가 우세한 중립 내지 세립 모래와 점토의 호층(sand dominated interbedded mediumto fine-grained sand and mud)

이 퇴적상은 모래가 우세한 가운데 판상 층리가 빈번하게 관찰되며, 점토가 층리사이에 수회 얇은층 내지 엽층 단위로 협재한다. 특히 고도 2.8~3.0 m 구

않는 괴상의 형태를 가지며, 청회색의 얼룩대가 불 규칙적으로 관찰되기도 한다.

이 퇴적상은 현재 논으로 사용되고 있으며, 교란 으로 인해 퇴적환경 해석이 어렵다.

# 3.1.2 점토가 우세한 세립질 모래 내지 점토충(mud dominated fine-grained sand to mud)

이 퇴적상은 약 30 cm 내외의 두께를 가지며 붉은 색 실트질 점토층 하부에 위치한다. 상위의 붉은색 실트질 점토층과는 달리 청회색을 띤다. 하부에는 세립질 모래가 우세하며 상부로 갈수록 점토가 우세 해지는 점이적 변화를 보여준다. 또한 상부의 점토



**Fig. 3.** Exposed sections in the trench site (a) and schematic diagram (b). The southern side (c) corresponds to the upper and lower part, and the northern side (d) corresponds to the middle part in the trench site.

간에서는 엽층의 점토가 불규칙적으로 변형된 다양 한 형태의 연질퇴적변형구조가 발달한다.

중립 내지 세립 모래와 점토층이 교호하는 것은 이 지역이 범람원 환경임을 지시한다. 또한 세립질 모래 내지 점토 퇴적상과는 달리 모래가 우세하고 점토가 얇게 발달하는 것은 하도로부터 거리가 상대 적으로 가까웠기 때문인 것으로 해석된다.

## 3.1.4 렌즈상의 조립질 모래충(lenticular coarsegrained sand)

이 퇴적상은 조립질 모래층이 렌즈상으로 발달하

elevation (m) depth (m) 4.5 - 0

며, 판상 내지 사층리가 발달하는 중세립 모래와 점 토의 교호 퇴적상 사이에서 관찰된다. 내부 층리나 퇴 적구조는 관찰되지 않으며 수평 연장성은 약 60 cm 이고, 두께는 10 cm 내외이다.

이 퇴적상은 퇴적단면에 극히 일부에서만 관찰되 며, 소규모로 발달하고 있어 환경해석이 어렵다.

#### 3.2 액상화 모래의 분출 양상

지표에 분출된 액상화된 모래는 최상부를 차지하 는 붉은색 실트질 점토층에서 확인된다. 지표 부근 인 고도 4.2~4.5 m에서는 주로 액상화된 모래가 주





대부분이다. 트렌치 단면에서 액상화된 모래는 실트 질 점토층과 대부분 불규칙적인 경계선을 보여주며

상의 형태로 관찰된다(그림 5a-5c). 폭은 수 cm 정도 이며 수직 길이는 최대 20 cm를 넘지 못하는 것이



**Fig. 5.** Occurrences of the intruded sand in the trench site. Pillar-like sand intrusions are observed near the top surface (a, b). However the large amount of sand intrusions are identified along the irregular surface from detached blocks in the silty mud (c, d, e, f). Irregular sand intrusions in the facies of mud-dominated, fine-grained sand to mud on plan view (g, h).

Sample	Elevation (m)	$^{14}$ C yr BP (±1 $\sigma$ )	Cal. yr BP ( $\pm 2\sigma$ )	Dating material	Laboratory code
TR_MC-01	3.2	$280\pm30$	$310\pm150$	Plant fragment	KGM-ITg171174
TR_MC-03	3.1	$280\pm30$	$310\pm150$	Plant fragment	KGM-ITg171176
TR_MC-05	3.1	$880 \pm 30$	$720\pm50$	Plant fragment	KGM-ITg171178
TR_MC-07	2.3	$560 \pm 40$	$590\pm70$	Plant fragment	KGM-ITg171180

Table 1. Results of AMS <sup>14</sup>C dating and calibrated dates for trench site.

폭 또한 불규칙적으로 변화한다. 그러나 고도 4.2 m 이하로는 액상화된 모래는 대부분 실트질 점토층과 뚜렷한 경계를 트렌치 단면에서 관찰하기 어렵다. 대 부분의 모래는 실트질 점토층의 불규칙적인 블록의 균열면을 따라 망상으로 교차하는 특징을 보인다(그 립 5c-5f). 균열은 보통 수십 cm의 길이를 가지며 특 정한 방향성을 보이지 않으며, 모래화산과 평행한 트 렌치 방향과 수직적인 방향보다는 아평행한 방향으 로 주로 관찰된다. 균열을 따라 관찰되는 액상화된 모 래는 상부(고도 4.2 m 이상)에서 주상의 형태로 관 찰되는 모래보다 상대적으로 규모가 큰 편이다. 트 렌치 단면과 수직 방향인 선형의 모래화산을 관통하 는 트렌치 단면에서도 뚜렷한 선형의 액상화된 모래 는 관찰되지 않으며 상기와 같이 망상으로 교차하는 양상으로 관찰된다.

경작지로 이용되는 두께 1 m 이상의 실트질 점토 층 직하위에 발달하는 점토가 우세한 세립질 모래 내지 점토층의 평면상에서 액상화된 모래는 주로 길 이 10 cm 내외로 불규칙적인 형태의 선형 또는 직경 5 cm 내외의 렌즈상 모래로 관찰된다(그림 5g, 5h). 또한 점토가 우세한 세립질 모래 내지 점토층과 하 위의 모래가 우세한 세립질 모래와 점토의 호층과의 경계부에서도 뚜렷한 모래의 주입흔적은 트렌치 단 면에서 관찰되지 않는다.

#### 3.3 탄소 연대

트렌치 단면에서 획득한 총 4개의 목편 시료들을 탄소연대측정에 사용하였다(표 1; 그림 4). 연대 측정 결과, 고도 2.3 m 지점에서 590 cal. yr BP, 고도 3.1 m 부근에서 310~720 cal. yr BP의 연대 분포범위를 갖 는다. 고도 3.1 m에서 720 cal. yr BP를 갖는 연대는 퇴적 당시 보다 오래된 목편이 곡강천의 범람에 의 해 유입된 것으로 판단된다. 따라서 트렌치 구간에 서 확인된 퇴적층은 대부분 약 600년 보다 젊은 것으 로 추정된다.

## 3.4 입도 분석

입도 분석구간의 하부인 고도 2.4~3.0 m 구간은 전반적으로 300~500 μm의 중앙값을 보여주며 모래 가 우세하게 나타났으며, 상부에 해당하는 고도 3.0~3.4 m 구간은 100 μm 이하의 중앙값으로 점토가 우세 하게 나타났다(그림 6a, 6b). 모래층 내에서는 점토 의 협재로 인해 중앙값이 변화하는 양상을 보여주며 상부로 갈수록 상향세립화 경향을 보여준다. 한편, 고도 2.53 m에서는 입도 분석 구간에서 관찰되는 모 래의 일반적인 중앙값 보다 매우 높은 600 μm 이상 의 중앙값을 보인다. 특히 이 지점에서의 최대 입경 은 1,200 μm이 넘는 것으로 확인되었다.

분출된 모래화산의 입도는 100~1,000 μm의 분포 를 보이며 주로 200~300 μm의 최빈값(mode)을 나 타냈다. 두 개의 단면에서 확보된 총 25개 시료에 대 한 입도 분포는 크게 다섯 가지 유형(유형 A~E)으로 구분된다(그림 6c). 유형 A는 10~20 μm의 최빈값을 보이며, 25개 시료 중 가장 세립질로 구성된다. 유형 B는 고도 3.10~3.25 m 및 2.59 m에 해당하며 20~30 μm의 최빈값을 가진다. 유형 C는 2.56 m, 2.85 m 및 3.05 m에 해당하며, 100~200 μm의 최빈값을 가진 다. 가장 우세한 분포 유형인 유형 D는 300 μm의 최 빈값을, 그리고 유형 E는 고도 2.53 m에 해당하며 700~800 μm의 최빈값을 나타낸다.

이상의 결과를 토대로 지표에 분출된 액상화 모래 는 입도분포 유형 D와 가장 유사한 최빈값을 보여주 며, 유형 D에 해당하는 모래층의 분포 고도는 2.41~3.00 m에 해당된다.

## 4. 토의

#### 4.1 액상화 모래의 발달특성

일반적으로 알려진 액상화에 의한 모래의 분출형 태는 퇴적층 단면에서 수직적인 기둥의 형태로 발달 하며 이러한 기둥은 하부의 기원이 되는 모래층과 연 결된다(Rodríguez-Pascua *et al.*, 2000, 2015; Guccione, 2005; Cox *et al.*, 2007). 이번 조사에서 확인된 액상 화된 모래는 트렌치 단면상에서 지표 부근에서만 매 우 작은 규모로 발달하고 있어 알려진 액상화된 모 래 주입 특성과는 형태적으로 차이가 있음을 알 수 있다.

한편, 고도 4.2 m 이하에서부터는 불규칙적인 균 열이 빈번하게 관찰되며 이러한 균열의 틈을 따라 대 량의 모래가 관찰되었다. 따라서 지표에 분출된 모 래의 양을 고려하면 지하에서 발달한 액상화 모래는



**Fig. 6.** Results of the grain size analysis in the section 1 and 2 of the northern side (refer to fig. 3). a. Grain size distribution limit for liquefaction from Tsuchida and Hayashi (1971). b. Grain size distribution changes with depth. c. Grain size distribution frequency curves (above) and representative frequency curves (below) of 25 samples. The sand volcano delineates blue line with rhombus symbol.

붉은색 실트질 점토층의 불규칙적인 망상의 균열을 따라 주입되었을 가능성을 보여준다. 트렌치 단면과 수직 방향인 선형의 모래화산을 관통하는 트렌치 단 면에서도 뚜렷한 선형의 액상화된 모래는 관찰되지 않는 것은 불규칙적인 망상의 형태가 2차원적인 형 태가 아닌 3차원적인 형태를 가지는 것으로 판단된 다. 3차원적인 망상 형태의 액상화된 모래를 추적하 기 위해 추가적인 단면확보 작업이 수반되어야 하는 상황이나 트렌치 내부로의 지하수 다량 유입으로 인 한 침수 및 괴상의 실트질 점토층의 분리 등으로 인 해 3차원적인 모래의 주입특성을 관찰이 용이하지 못했다.

트렌치 조사 당시 퇴적층 상부에 해당하는 붉은 색 실트질 점토층이 고화된 상태로 수분함량이 적었 던 것을 고려하면 이러한 균열은 점토가 수축하여 형성된 것으로 볼 수 있다. 그러나 이번 포항지진으 로 광범위하게 분포하는 다수의 모래화산들은 대부 분 분출구가 일정방향으로 선형을 이루고 있고 길이 도 수 m에서 수십 m에 이르고 있어 단순히 점토 수 축에 의한 불규칙적인 균열면을 따른 분출이 아닐 수 있음을 의미한다. 따라서 일정한 방향성을 가지 는 모래화산 분출 양상을 고려하면 약 1 m의 두께를 가지는 붉은색 실트질 점토층은 지진동에 의하여 균 열이 형성되었을 가능성이 크며 이러한 균열을 따라 모래가 수동적으로 관입된 것으로 판단된다.

#### 4.2 액상화 모래의 기원

액상화는 지하수 등에 의해 포화된 상태의 퇴적물 (주로 모래 또는 실트)에서 지진동에 의해 간극수압 의 상승으로 입자간 전단력을 잃어 액체 상태로 변 화하는 현상이다(Allen, 1982; Owen, 1987; Kang et al., 2010; Lee et al., 2010, 2014). 지진동에 의한 액상 화 영역은 지진에 의한 주기성 전단응력과 액상화에 필요한 최소 응력간의 관계에 따라 결정된다(Seed and Idriss, 1971; Shon et al., 2000). 즉, 심도에 따른 두 응력 조건이 동시에 충족되어야 액상화가 발생할 수 있다. 그러나 심도가 깊어질수록 지표를 덮고 있는 퇴 적물에 의한 수직유효응력의 증가는 하위의 퇴적물 입자간 전단강도를 증가시키기 때문에 깊은 심도에 서는 액상화가 일어나기 어렵다(Obermeier, 2009). 따라서 대부분의 액상화가 이루어지는 심도는 최대 30 m까지 보고된 바 있으며, 일반적으로는 10~20 m 이내로 알려져 있다(Crespellani *et al.*, 1988; Stewart and Knox, 1995; Obermeier, 2009; Owen and Moretti, 2011). 트렌치를 통해 확인된 모래질 퇴적층(고도 2.1~ 3.1 m)은 심도 5 m 이내에 분포하며 입도분석 결과 Tsuchida and Hayashi (1971)가 제시한 액상화가 잘 발생할 수 있는 입도를 가지고 있다(그림 6a). 또 한 액상화가 발생되는 투수성이 높은 퇴적층 상위에 불투수성 퇴적층이 존재하며, 모래층이 지하수위 아 래에 위치하는 점은 2017 포항지진으로 인해 액상화 가 발생했을 가능성이 크다.

2017 포항지진으로 인해 지표로 분출된 모래는 유 형D에 해당하는 모래층의 입도 분포와 유사한 양상 을 보여주고 있으며 2.41~3.00 m의 고도 분포를 가 진다. 이 구간은 모래층이 우세한 가운데 점토층이 모래층의 상부 및 하부에 발달한다. 상부에서 관찰 되는 점토층은 수 매로 구성되며 연질퇴적변형구조 가 발달한다(그림 7). 이 구조는 대부분 모래에 의해 변형을 받아 불규칙적으로 절단된 형태를 띤다. 그 러나 하부의 실트질 점토층은 일부 구간에서 휘어지 는 양상을 보이나 상대적으로 상부의 점토층의 변형 정도보다는 약하게 나타난다. 이는 모래층이 지진동 에 의한 액상화가 진행되고 상대적으로 압력이 낮은 상부로 이동하면서 상부의 점토층을 변형시킨 것으 로 여겨진다. 하부 실트질 점토층에서는 변형정도가 상대적으로 미약하고 모래에 의해 절단되지 않은 특 징을 보이는데, 이는 하부 실트질 점토층의 하위에 서 액상화가 진행되었다 하더라도 모래화산은 하부 의 실트질 점토층 상위에서 기원되었던 것으로 여겨 진다. 따라서 입도 유형 D의 분포 고도 중 모래화산의 기원은 하부의 실트질 점토층 상위인 고도 2.6~3.0 m 구간(심도 1.5~1.9 m)에 해당되는 것으로 판단된다.

한편, 유형 D의 분급은 300 µm의 동일한 최빈값을 보이는 모래화산의 분급보다 상대적으로 좋은 편으로 나타났다. 이는 액상화된 모래가 상부로 주입될 당시 압력에 의한 특정 크기의 입자를 운반하는 선택적인 입자의 이동이 아님을 지시하며, 지표로 분출된 모 래화산이 모래화산 기원의 모래질 퇴적층보다 분급 도가 낮은 것은 상향으로 주입되는 과정 중 상위의 세립질 퇴적물이 함께 수반된 결과로 여겨진다.

#### 4.3 고액상화 기록

조사 지역의 모래층은 전반적으로 중립질 모래가

우세하며 일부 조립질 모래층(트렌치 북측 2단면)이 렌즈상으로 나타난다(그림 8a). 렌즈상의 조립질 모 래층의 폭은 50 cm 내외이며 두께는 5 cm 내외로 관찰된다. 이 퇴적층의 상부 경계는 수평적으로 일 정한 선형을 보이지만 하부의 경계는 기복이 심하며 불규칙적이다. 렌즈상의 조립질 모래층 하부 경계에 서 뚜렷한 침식경계를 가지고 있지 않으며, 렌즈상 의 조립질 모래층 내부에 작은 규모의 렌즈상 중립 질 모래가 협재하는 것은 렌즈상의 조립질 모래층이 소규모 하도의 발달 또는 하천과 매우 인접한 환경 에서의 1차적인 퇴적산물이 아님을 의미한다. 또한 하부경계의 기복이 심하며 하위의 중립질 모래층에 서 단속적으로 수직방향의 조립질 모래가 렌즈상으 로 생물 굴진흔적과 같이 발달하는데(그림 8b, 8c), 이는 전반적인 연구지역 퇴적층에서 생물 굴진흔적 이 관찰되지 않으며, 조립질 모래층의 퇴적과 같이 상대적으로 에너지가 강했던 퇴적환경에서 생물에 의한 굴진흔적이라고 보기도 어렵다.

트렌치 북측 2단면에서 상향세립화 경향을 보이다

가 렌즈상의 조립질 모래층에서 급격히 증가하는 입 도 변화를 보인다(그림 6b). 렌즈상의 조립질 모래층 을 제외하면 상향 세립화 경향이 뚜렷하게 나타나며 하천의 범람이후 점차 에너지가 감소하여 모래에서 점토와 같은 세립질 퇴적물이 순차적으로 퇴적되는 범람원의 일반적인 퇴적양상과 일치한다.

렌즈상의 조립질 모래층 1차적인 퇴적양상과 차 이를 가지는 점과 렌즈상의 조립질 모래층 하위에서 조립질 모래가 수직으로 관입한 흔적들은 심부의 조 립질 모래층이 액상화로 인해 상위로 분출했을 가능 성이 존재한다. 렌즈상의 조립질 모래층 하위에 발달 하는 모래가 우세한 중립 내지 세립질 모래와 점토의 교호층(트렌치 남측 하부)에서 연질퇴적변형구조 등 과 같은 지진동에 의한 액상화 기록이 관찰되지 않 는 것은 이와 같은 해석을 뒷받침하며 렌즈상 조립질 모래는 트렌치 단면에서 확인된 퇴적층보다 하위에 위치할 것으로 판단된다. 2017 포항지진에 의한 추 정된 액상화 구간은 고도 약 2.4~3.0 m으로 확인되 었으며 추가적으로 렌즈상 조립질 모래층의 기원이



**Fig. 7.** Occurrences of the soft-sediment deformation structures observed at 2.8-3.0 m in elevation. a, b. Mud layers are segregated and deformed irregularly (white arrows). c, d. Sand intrusions are frequently observed between the deformed mud layers (blue arrows).

되는 심부의 조립질 모래층에서의 액상화는 최소 수 m 간격의 액상화 구간을 보여준다. 일반적으로 액 상화는 특정 단일 층준을 따라 발생하는 점을 고려 하면(Sims, 1973), 최소 수 m의 수직적인 간격을 가 지는 하부의 액상화 구간은 2017 포항지진에 의한 액상화가 아닌 과거 지진에 의한 액상화 현상이 있 었던 것으로 추정된다.

렌즈상의 조립질 모래층이 수직적인 기둥의 형태 가 아닌 횡적으로 연장되는 렌즈상으로 발달하고, 북 측 2단면의 입도변화와 같이 렌즈상 조립질 모래층 을 제외하면 점이적인 상향 세립화 경향을 잘 보여 주는 것은 하천의 범람이후 중립질 모래의 퇴적이 진행되고 점토와 같은 뜬짐의 퇴적이 진행되기 전 액상화된 조립질 모래가 분출하였음을 의미한다. 렌 즈상 조립질 모래층 상위의 실트질 점토층이 횡적인 연장성을 보여주고 있으나 유동구조의 형태로 변형 이 관찰되는 것은 2017 포항 지진으로 인해 변형이 되었을 가능성이 크다. 액상화 구간 상위에 관찰되 는 점토층의 변형에 비해 상대적으로 변형정도가 약 한 것은 2017 포항 지진의 액상화가 실트질 점토층 상위에서 주로 발생했기 때문인 것으로 여겨진다. 따라서 실트질 점토층의 상위 및 하위에 발달하는



**Fig. 8.** Occurrences of the lenticular coarse-grained sand below the silty mud bed. a. Overall view of the northern side in the trench site. b. Conspicuous grain size change between silty mud and lower medium-grained sand. c. vertical to subvertical sand intrusions below the lenticular coarse-grained sand (white arrows) and isolated medium-grained sand layers in the lenticular coarse-grained sand (blue arrows).

모래가 우세한 중립 내지 세립 모래와 점토의 교호 층에서의 탄소연대가 각각 310±150 cal. yr BP 및 590±70 cal. yr BP이며(그림 4), 액상화는 규모 5내 지 5.5이상에서 발생하는 점을 고려하면 최소한 규 모 5이상의 지진이 310~590 cal. yr BP 에 발생했던 것으로 추정되며 이를 환산하면 AD 1360~1640년 에 해당된다(그림 9).

과거 약 2천년 동안의 역사지진 기록은 여러 기관 및 연구자들에 의해 연구되어 왔다(Korea Institute of Energy and Resources, 1983; Korea Institute of Nuclear Safety, 1999; Yoon *et al.*, 2001; Lee, 2006; Korea Meteorological Administration, 2012). 그러 나 역사기록으로부터 지진 발생 시기는 추정이 가능하나 직접적으로 MM 진도와 같은 등급 기준을 적용하는 데 있어 어려움이 있을 뿐만 아니라 감진 구역의 범 위 등 평가자의 지진학적 해석에 따라 목록별로 많은 차이를 보인다(Yoon *et al.,* 2001; Lee, 2006; Korea Meteorological Administration, 2012). 실제로 AD 1360~1640에 해당하는 역사지진은 『고려사』, 『고려 사절요』, 『증보문헌비고』, 『조선왕조실록』 등을 종합 하면 약 950여 건의 지진기록이 있으며, 이들 중 포항 (영일, 흥해, 장기) 및 포항 주변 지역, 그리고 전국적으로 감진된 기록만 수십 건에 달한다(Korea Meteorological Administration, 2012). 따라서 이번 연구 결과로부 터 얻어진 연대가 사료에서의 특정지진 시기를 결정하 기는 어려우나 액상화의 기록을 통해 포항지역에서



Fig. 9. Schematic diagram of the examined deposits. Paleo-liquefaction had been developed in coarse-grained sand deposit below alternation of the medium-grained sand and mud apart from few tens centimeters to few meters.

규모 5 이상의 비교적 큰 지진이 발생했던 것은 포항을 포함하는 한반도 동남부 일대의 고지진을 추정하는 데에 있어 기초 자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

- 2017년 11월 15일 경상북도 포항시 흥해읍 일 원에 M<sub>L</sub> 5.4 지진으로 인해 발생한 모래화산을 대상으로 액상화된 모래의 분출과정 및 지하의 액상화 구간을 파악하기 위해 트렌치 조사가 수 행되었다.
- 2) 연구지역의 퇴적층은 최상부의 경작토인 실트질 점토층을 제외하면, 점토가 우세한 세립질 모래 내지 점토층, 모래가 우세한 중립 내지 세립 모 래와 점토의 호층, 그리고 렌즈상의 조립질 모 래층으로 구분되며 범람원 환경으로 해석된다.
- 3) 액상화된 모래는 트렌치 하부의 모래층이 상부의 실트질 점토층의 불규칙적인 망상의 균열을 따라 주입되어 지표로 분출된 것으로 확인되었다.
- 4) 입도분석 결과, 조사지역의 퇴적층은 다섯 가 지의 입도 분포 유형으로 구분되며, 분출된 모 래화산의 모래는 200~300 µm의 최빈값을 보 여주는 고도 2.41~3.00 m 구간의 퇴적층과 유 사한 입도 분포를 보여준다. 이 구간을 중심으 로 상부의 점토층에서는 연질퇴적변형구조가 발달하고 하위의 실트질 점토층에서는 상대적 으로 약한 변형정도 고려하면 고도 2.6~3.0 m 구간에서 모래화산이 기원된 것으로 판단된다.
- 5) 고도 2.53 m 부근에서 현저한 입도 차이를 보 이는 렌즈상의 조립질 모래층은 과거 지진에 의 해 액상화된 모래가 주입된 결과로 여겨지며, 렌 즈상의 조립질 모래층 상하위층에서 각각 산출 된 탄소연대를 바탕으로 최소한 규모 5 이상의 지 진이 AD 1360~1640년 시기에 발생했던 것으 로 추정된다. 이러한 결과는 한반도 동남부 일대 고지진 연구에 기초적인 자료가 될 수 있을 것 으로 여겨진다.

## 감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원 R&D 과제인 "국 토 대단층계(양산단층 중부지역) 위험요소 평가연구 (GP2018-017)"에 의해 수행되었습니다. 이 논문의 개선을 위해 유익한 심사를 해주신 강희철 박사님과 익명의 심사위원님께 깊은 감사를 드립니다.

#### REFERENCES

- Allen, J.R.I., 1982, Sedimentary structures : Their Character and physical basis, Vol II. Elsevier, New York, 663 p.
- Cho, S.-I., Choi, W.-H., Hwang, J.S., Choi, J.-W. and Chang, C.-J., 2012, Introduction of Eupcheon Fault Monitoring System. Journal of the Geological Society of Korea, 48, 533-542 (in Korean with English abstract).
- Cox, R.T., Hill, A.A., Larsen, D., Holzer, T., Forman, S.L., Noce, T., Gardner, C. and Morat, J., 2007, Seismotectonic implications of sand blows in the southern Mississippi Embayment. Engineering Geology, 89, 278-299.
- Crespellani, T., Nardi, R. and Simoncini, C., 1988, La liquefazione del terreno in condizioni sismiche. Zanichelli, Bologna, 185 p.
- Guccione, M.J., 2005, Late Pleistocene and Holocene paleoseismology of an intraplate seismic zone in a large alluvial valley, the New Madrid seismic zone, Central USA. Tectonophysics, 408, 237-264.
- Kang, H.-C., Paik, I.S., Lee, H.I., Lee, J.E. and Chun, J.H., 2010, Soft-sediment deformation structures in Cretaceous non-marine deposits of southeastern Gyeongsang Basin, Korea: Occurrences and origin. Island Arc, 19, 628-646.
- Kim, Y.S., Kim, T., Kyung, J.B., Cho, C.S., Choi, J.-H. and Choi, C.U., 2017, Preliminary study on rupture mechanism of the 9.12 Gyeongju Earthquake. Journal of the Geological Society of Korea, 53, 407-422 (in Korean with English abstract).
- Ko, K., Kim, S.W., Lee, H.J., Hwang, I.G., Kim, B.C., Kee, W.-S., Kim, Y.-S. and Ghim, Y.S., 2017, Soft sediment deformation structures in a lacustrine sedimentary succession induced by volcano-tectonic activities: An example from the Cretaceous Beolgeumri Formation, Wido Volcanics, Korea. Sedimentary Geology, 358, 197-209.
- Ko, K., Park, S.-I. and Kwon, C.W., 2015, Soft-sediment deformation structures in the Cretaceous Gyeokpori Formation of the Buan area, Korea: Structural characteristics, reconstruction of paleoslope and triggering mechanism of slump. Journal of the Geological Society of Korea, 51, 545-560 (in Korean with English abstract).
- Korea Institute of Energy and Resources, 1983, Seismic risk map of Korea, 295 p (in Korean).
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2006, Report on Aggregate Resources in the southern part of Gyeongsangbuk-do. Ministry of Construction and Transportation, 286 p (in Korean).

- Korea Institute of Nuclear Safety, 1999, Evaluation and Cataloging of Korean Historical Earthquakes. Korea Institute of Nuclear Safety, 176 p (in Korean with English abstract).
- Korea Meteorological Administration, 2012, Historical earthquake records in Korea (2~1904). Korea Meteorological Administration, 279 p.
- Korea Water Resources Corporation, 2015, Report on Aggregate Resources in Pohang and Gyeongju cities. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 201 p (in Korean).
- Kyung, J.B. and Okada, A., 1995, Liquefaction phenomena due to the occurrences of great earthquakes: Some cases in Central Japan and Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 31, 237-250 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.I., Paik, I.S. and Chun, J.H., 2010, Soft-sediment deformation structures in the Cretaceous Jinju Formation in the Sacheon area, Korea: occurrences and origin. Journal of the Geological Society of Korea, 46, 305-315 (in Korean).
- Lee, H.I., Paik, I.S., Kang, H.-C. and Chun, J.H., 2014, Occurrences and origins of soft-sediment deformation structures in the late Pleistocene marine terrace deposits of the southeastern coast of Korea. Geoscience Journal, 18, 149-165.
- Lee, H.-S., 2006, Analysis of historical earthquake data in Korea. Studies on Constitutional Cases, 19, 55-63 (in Korean with English abstract).
- McCalpin, J.P. and Nelson, A.R., 2009, Introduction to paleoseismology. In McCalpin, J.P. (eds.), Paleoseismology-2nd edition. Academic Press, San Diego, 1-27.
- Obermeier, S.F., 2009, Using liquefaction-induce and other soft-sediment features for paleoseismic analysis. In McCalpin, J.P. (eds.), Paleoseismology-2nd edition. Academic Press, San Diego, 497-564.
- Owen, G., 1987, Deformation processes in unconsolidated sands. In: Jones, M.E., Preston, R.M.F. (eds.), Deformation of sediments and sedimentary rocks. Geological Society Special Publication, 29, 11-24.
- Owen, G. and Moretti, M., 2011, Identifying triggers for liquefaction-induced soft-sediment deformation in sands. Sedimentary Geology, 235, 141-147.
- Rodríguez Pascua, M.A., Calvo, J.P., De Vicente, G. and Gomez Gras, D., 2000, Seismites in lacustrine sediments of the Prebetic Zone, SE Spain, and their use as indicators of earthquake magnitudes during the late Miocene. Sedimentary Geology, 135, 117-135.

- Rodríguez Pascua, M.A., Silva, P.G., Pérez-López, R., Giner-Robles, L., Matín-González, F. and Del Moral, B., 2015, Polygenetic sand volcanoes: On the features of liquefaction processes generated by a single event (2012 Emilia Romagna 5.9 MW earthquake, Italy). Quaternary International, 357, 329-335.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M., 1971, A simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 97, 1249-1274.
- Seilacher, A., 1984, Sedimentary structures tentatively attributed to seismic events. Marine Geology, 55, 1-12.
- Shon, H., Lim, H.-C. and Lee, D.-G., 2000, A study on the liquefaction of saturated sand layer under oscillationg water pressure. Journal of the Korean Society of Groundwater Environment, 7, 59-65 (in Korean with English abstract).
- Sims, J.D., 1973, Earthquake-induced structures in sediments of Van Norman Lake, San Fernando, California. Science, 182, 161-163.
- Song, H.-R. and Kim, W.-J., 2013, Effects of Risk Characteristic and Risk Perception on Risk Severity of Natural Disaster. The Korea Contents Society, 13, 198-207 (in Korean with English abstract).
- Stewart, D. and Knox, R., 1995, What us the maximum depth liquefaction can occur? In Proceedings of the 3rd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Aprill 2-7, 1995, Volume III, St. Louis, Missouri, pp. 1157-1161.
- Tsuchida, H. and Hayashi, S., 1971, Estimation of liquefaction potential of sandy soils. In Proceedings of the 3rd Joint Meeting, US-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, May 1971, UJNR, Tokyo, pp. 91-109.
- Van Loon, A.J., Brodzikowski, K. and Zielinski, T., 1995, Shock-induced resuspension deposits from a Pleistocene proglacial lake (Kleszców Graben, central Poland). Journal of Sedimentary Research, A65, 417-422.
- Yoo, Y., Yoon, C, Lee, H. and Lee, J., 2011, A study on natural disaster damage and response in Vulnerable Country. The Journal of Applied Geography, 29, 77-93 (in Korean).
- Yoon, S.-O., Jeon, J.-B. and Hwang, S.-I., 2001, Time-spatial characteristic of earthquakes in Korea Peninsula sice Choseon Dynasty. Journal of Korean Geomorphological Society, 36, 93-110 (in Korean with English abstract).

Received	:	March	21,	2018
Revised	:	June	15,	2018
Accepted	:	June	19,	2018