

<Review>

국내외 제4기 지질도 제작 사례 비교 분석

김진철

한국지질자원연구원 국토지질연구본부

요 약

신생대 제4기는 극심한 기후 변동과 현생 인류의 출현으로 지질시대에서의 그 중요성이 매우 크다. 제4기 동안에 형성된 암석 및 퇴적물들의 시공간적 분포와 물질 특성들을 도면에 나타낸 것이 제4기 지질도이다. 국외의 제4기 지질도는 주로 미국과 유럽 국가들을 중심으로 1970~80년대에 제작이 진행되었고 2000년대 들어와서 고해상의 디지털화된 지질도가 완성되었다. 국내에서는 2010년대부터 제4기 지질의 지질 연대, 퇴적 층서, 형성 조건들에 대한 연구와 더불어 이를 활용한 제4기 지질도 작성 사업이 본격적으로 시작되었다. 국내의 제4기 지질도 제작 방식은 프로파일 형태(profile type)와 표층도 형태(superficial type)로 크게 구분된다. 이번 논평에서 제안한 혼합된 형태의 제4기 지질도 제작 방식은 프로파일 형태와 표층도 형태의 장점을 혼합한 형태의 제작 방식으로 국내 조사 환경에 적합하며 다양한 지질 정보 제공이 가능하다. 이와 더불어 제4기 지질도 제작을 위하여 제4기 지질 정보 및 지질 범례의 표준화가 필수적이다. 국내에서의 제4기 지질도 제작은 학문적, 사회적, 경제적 측면에서 매우 시급하며, 수요처 발굴을 통한 대국민 서비스 관점의 맞춤형 제4기 주제도 관점의 제작 접근이 필요하다.

주요어: 제4기, 지질도, 퇴적, 층서, 지형

Jin Cheul Kim, 2020, Comparative cases analysis of the Quaternary geological map production in Korea and overseas. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 6, p. 803-815

ABSTRACT: The Quaternary is an important period in the geologic time due to extreme climate fluctuations and the modern human occupations. The Quaternary map shows the spatio-temporal distribution of rocks and sediments deposited during the Quaternary period. The Quaternary geological maps have been produced mainly in the United States and European countries since the 1970s, which were digitalized with high resolution in early 2000s. In Korea, research of the Quaternary geologic age dating, sedimentary stratigraphy, paleo-environments of Quaternary sediments and the Quaternary geological map project based on them began from the 2010s. The Quaternary geological map in Korea is divided into profile type and superficial (surficial) type. The mixed-type of the Quaternary geological map proposed in this article is suitable for domestic geologic environment, and can provide various geological information. Also, for the Quaternary geological map in Korea, first of all, it is essential to standardize the geological information and the legend. The Quaternary geological map in Korea has a need in terms of academic, social, and economic, and it is necessary to approach the concept of a customized Quaternary thematic map that can be used for public service following social demands.

Key words: Quaternary, geological map, sedimentation, stratigraphy, topography

(Jin Cheul Kim, Geology Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

1. 서 론

신생대 제4기는 신생대를 나누는 세 기간(고 제3기: Paleogene, 신 제3기: Neogene, 제 4기: Quaternary)

중에서 258 만년 전부터 현재까지를 포함하는 가장 최근의 지질학적 시간이다. 이 시기에는 빙기와 간빙기가 교차되는 극심한 기후 변동과 현생 인류의 출현으로 지질학적으로는 매우 짧은 기간이지만 지

* Corresponding author: +82-42-868-3137, E-mail: kjc76@kigam.re.kr

질시대에서의 그 중요성은 매우 크다. 제4기 지질은 제4기 동안에 형성된 암석 및 지표층을 덮고 있는 퇴적물들이 주 연구 대상물질이다. 제4기 동안에 형성된 퇴적물들은 일반적으로 속성작용(diagenesis)을 받지 않은 미고결 퇴적물들이 주를 이루며 주로 지형적 환경에 영향을 받아 퇴적된다. 이러한 퇴적물들은 퇴적될 당시의 환경에 따라 봉적기원 퇴적층(colluvial deposits), 산상지성 퇴적층(alluvial deposits), 하성 퇴적층(fluvial deposits), 호성 퇴적층(lacustrine deposits), 해성 퇴적층(marine deposits), 빙성 퇴적층(glacial deposits) 그리고 화산 퇴적층(volcanic deposits) 등으로 크게 구분된다.

제4기 동안에 형성된 암석 및 퇴적물들의 시공간적 분포와 물질 특성들을 도면에 나타낸 것이 제4기 지질도이다. 제4기 지질도는 인간의 생활 환경과 밀접하게 연관되는 표층의 지질 정보를 제공하며, 모래, 자갈 등의 골재 자원 분포, 수문 관리 및 환경 오염, 지진 재해를 포함하는 표층 지반 안전성, 그리고 토목 및 건축을 위한 지표 지질 정보 등에 활용된다. 한국의 제4기 지층은 기존 암석 지질도 내에 ‘충적

층’(Q_a) 으로만 표현되어 있으며, 세부 구분 및 설명은 포함되어 있지 않다. 국내에서의 제4기 지질도는 2010년대 초반부터 “한반도 제4기 지질 주제도”라는 이름으로 제작이 시작되었고 현재까지도 주제도 형태로 제작되고 있다. 이번 연구에서는 국내에는 많이 알려지지 않은 제4기 지질도의 외국 제작 사례들을 살펴보고 그 특징들을 소개하며, 국내의 제4기 지질도 제작 현황 및 특성, 그리고 앞으로의 한반도 제4기 지질도 제작을 위한 제언을 하고자 한다.

2. 제4기 지질도 관련 해외 사례

국외의 제4기 지질도는 주로 미국과 유럽 국가들을 중심으로 1970~80년대에 제작이 진행되었고 2000년대 들어와서 고해상의 디지털화된 지질도가 완성되었다.

2.1 영국 제4기 지질도

영국의 경우 영국 지질조사소(BGS: British Geological Survey)를 중심으로 1977년에 1:62.5만 축척의 첫번째 제4기 지질도가 발간되었다(그림 1). 이 지질도는

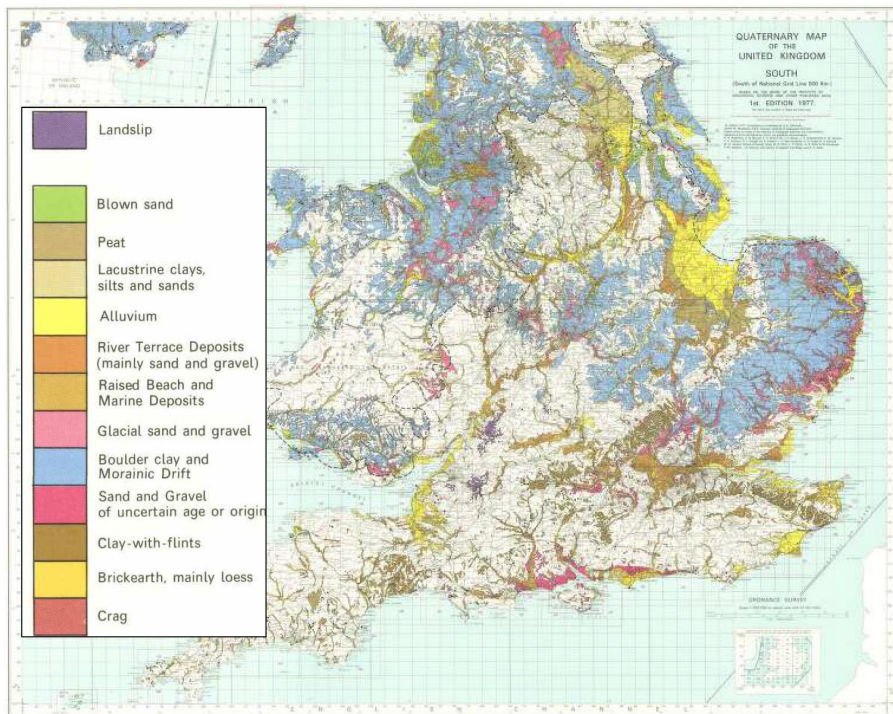


Fig. 1. 1:625,000 Quaternary map of the United Kingdom: 1977. The subdivisions of Quaternary deposits shown on this map can be classified into 11 units (British Geological Survey, 2020).

퇴적 시기가 고려되지 않은 퇴적 환경을 기준으로 총 11개의 지질도 범례(landslip, brown sand, peat, lacustrine sediments, alluvium, river terrace deposit, beach and marine deposits, glacial deposits, unknown age sand and gravel, morainic deposit, loess)로 구분된다. 1986년에 기반암의 암상과 제4기 퇴적물을 같이 표기하는 1:25만 축척의 지질도를 발간하였으며 암상과 구조 해석 등을 지도에 포함시켰다. 이 지질도에서는 기반암 정보와 제4기 표층(superficial) 정보가 포함된 디지털화된 지도가 제공되었다. 현재는 총 11개로 구분된 제4기 영역(Quaternary domains: coastal and estuarine, dissected till, fluvial, ice-scoured montane, lowland basin, lowland periglacial, minimal till, montane and valley, plateau and valley, till dominant, upland periglacial)의 1:25만, 1:5

만, 1:1만 축척의 제4기 지질 정보를 포함한 지질도가 제공된다(그림 2a~d). 지도에 표시되는 제4기 영역은 지형적 특성과 지표 퇴적물에 따라 구분되는데 일부 지역에서는 대략적인 제4기층 단면(cross section) 정보도 함께 제공된다. BGS의 제4기 지질도 기본 개념은 최상부 지층(uppermost geological unit)의 지질 정보 제공이다. 제4기층의 분포 범위는 소위 '1 metre rule'이 적용되었는데 이는 자연적으로 퇴적된 퇴적층을 대상으로 1 m 이상의 퇴적층이 관찰될 경우 제4기층 분포 범위에 포함시켜 지표 1 m 퇴적층의 지질 특성을 지도에 표시하게 된다. 지표 1 m 보다 하부에 분포하는 제4기 퇴적층(sub-surface units)의 정보는 주제도 개념으로 따로 제공되는데, 한 예로 1:5만 축척의 표층 두께 모델(superficial deposits thickness models)은 시추공 정보(약 60,000공)를

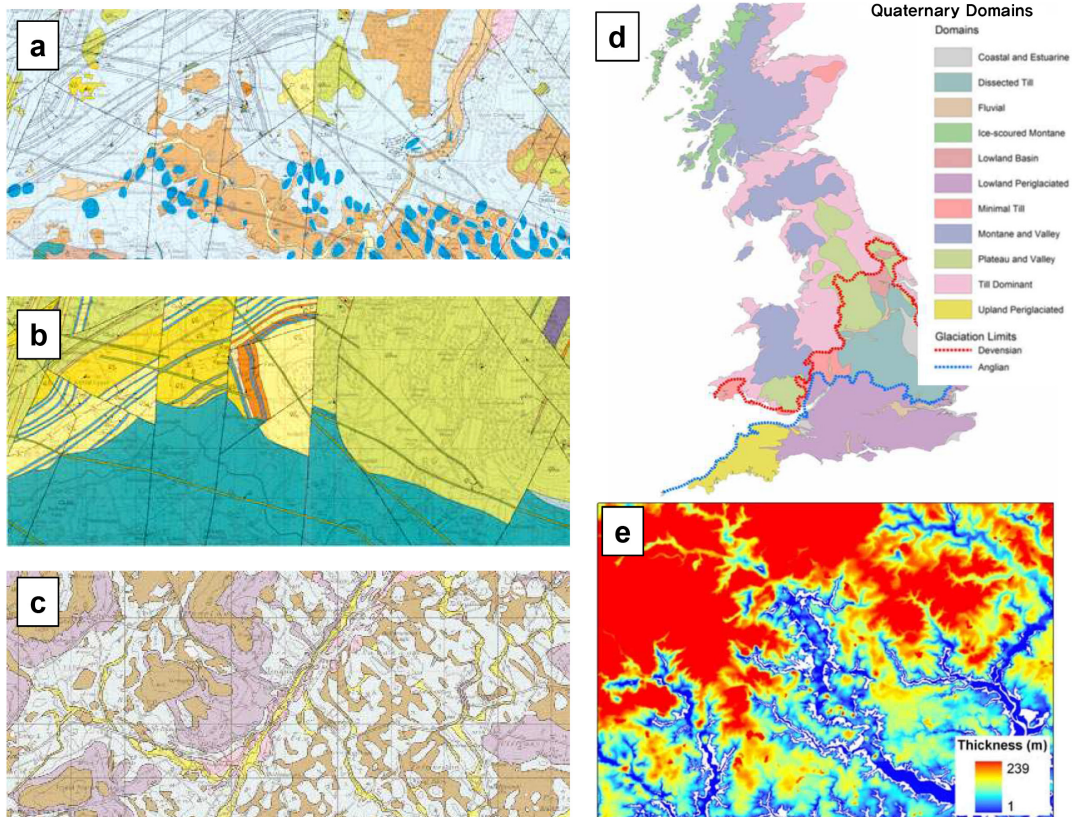


Fig. 2. BGS 1:50,000 scale map. a: combined bedrock and superficial deposits, b: bed rock, c: superficial deposits, d: Quaternary domains, e: superficial deposits thickness model (Geology of Britain viewer, 2020), 11 different Quaternary domains are recognized. These domains are represented by consistent geomorphological features (landforms), with typical assemblages of superficial eposits. The superficial deposits thickness models show the depth of the bedrock surface.

이용하여 제4기층 분포 지역의 미고화 퇴적층 두께를 색으로 표시한 주제도이다(그림 2e). 이러한 제4기 주제도는 토목공학, 지하수 개발, 지하수 오염, 산사태 및 지표 변형 예측 등에 활용되고 있다.

2.2 유럽 제4기 지질도

유럽 국가들은 각 나라별로 퇴적상 또는 암상, 형성 연대 그리고 구성단위(unit) 별 형성 과정에 대한 표기 방식의 차이를 단일화하여 1995년도에 1:250만 축척의 제4기 지질도를 발간하였다. 이 지도에서는 자원 분포에 대한 기본적인 정보와 자연 재해, 국토 이용을 위한 정보 제공을 목표로 한다. 단일화된 지질도를 디지털화하고 일부 내용들을 수정하기 위하여 각국의 지질조사소를 중심으로 2011년부터 IQAME 2500(1:2.5 Million International Quaternary Map of Europe) 국제 프로젝트를 구성하여 각국의 제4기 지질도를 단일화하고 국가 간 경계를 연결하여 하나의 유럽 제4기 지질도를 완성하기 위한 작업들을 현재까지 진행하고 있다(그림 3). IQAME 2500의 핵심은 형성 연대, 퇴적상 또는 암상, 그리고 성인을 단일화하고 지리정보시스템(geographic information system: GIS)기반의 디지털 지도를 완성하는 것이다. 이 지도에는 지형, 빙하 형성 특징, 시추 및 연구 대상 주요 위치, 빙하 최대 한계, 영구 동토 경계, 그

리고 활성 단층 등의 다양한 정보가 수록된다. 또한 관심지역을 중심으로 지질 및 고생물 관심지역, 인간간섭지역, 화산활동지역 등으로 구분한다.

2.3 미국 제4기 지질도

미국의 제4기 지질도는 미국 지질조사소(USGS: United States Geological Survey)와 각 주의 지질조사소 그리고 대학들이 연합하여 제작하고 있다. 미국 전역을 대상으로 한 제4기 지질도는 “U.S. Geological Survey Quaternary Geologic Atlas of the United States Map”이라는 이름으로 발간되었는데, 이는 미국 전역에 걸쳐 1:100만 축척으로 제4기 표층(surficial) 퇴적층의 지질 정보를 제공한다. 이 지질도에서는 표층에 분포하는 가장 젊은 퇴적층을 대상으로 퇴적 환경별(glacial, alluvial, eolian, lacustrine, marine, and landslide deposits) 분포를 나타내며, 또한 붕적층(colluvium), 잔적층(residuum), 그리고 부식 암석(saprolite)과 같은 경사면이나 고지대에 분포하는 퇴적층도 포함하고 있다. 지질 범례는 암상, 조직, 기원, 층서, 형성 연대 그리고 지형적 특성에 따라 구분된다. 이 지도에서는 토양(soil)은 포함되지 않으며, 수치지형도는 $4^{\circ} \times 6^{\circ}$ 사각영역(quadrangle)을 기초로 작성된다(그림 4a). 지질도 식별 부호(identification code)는 “the International Map of

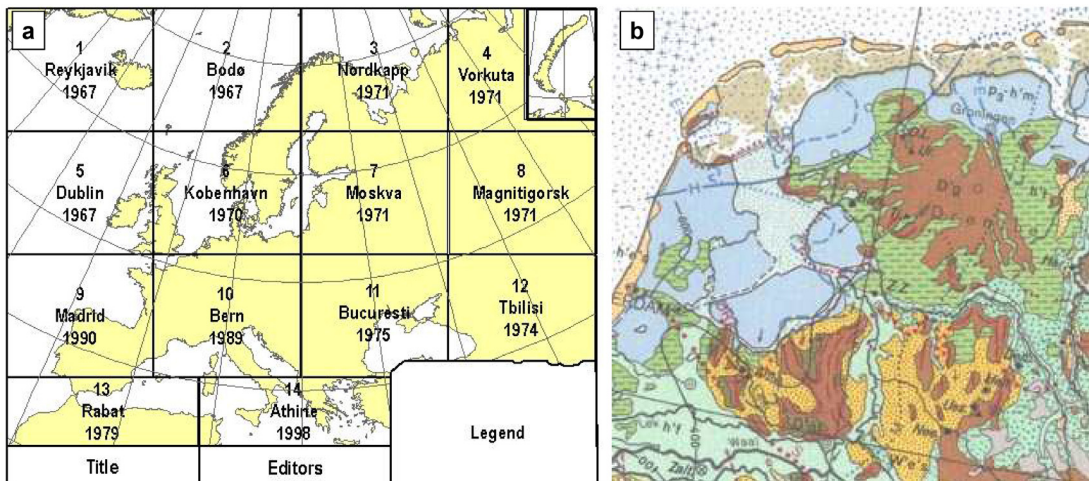


Fig. 3. 1:2,500,000 scale Quaternary map of European countries (a), and example of the IQAME 2500 map (b). The legend on each of the 14 map sheets is in German and, depending on the territories covered, in English, French or Russian. The map shows Quaternary features such as end moraines, ground moraine hillocks, kames, drumlins, eskers, ice border lines, the directions of ice movements, limits of marine transgressions and tectonic faults (International Quaternary Map of Europe 1:2.500.000, 2020).

the World Identification Code”를 따른다. 이 지질도는 지난 2백만년 동안에 형성된 지표층을 덮고 있는 퇴적층 및 암상을 지도에 표시함으로써 신생대 제4기의 인류 기원을 포함하는 지표 물질의 정보를 제공함을 목표로 한다.

한편, 각 주의 지질조사소를 중심으로 서로 다른 형태의 제4기 지질도가 제작되었는데, 예로 미국 북동부의 제4기 지질도는 “Map showing the thickness and character of Quaternary sediments in the glaciated United States east of the Rocky Mountains”라는 이름으로 1970년도에 1:100만 축척의 지질도가 발간되었다(그림 4b~d). 이 지질도에서는 미국 북동부를 중심으로 분포하는 제4기 퇴적층의 두께와 지질 특성들을 주로 나타내며, 지질도에 포함되는 제4기 퇴적층은 주로 빙하와 관련된다. 이 지질도

에서는 제4기 퇴적층의 표층 분포, 제4기 퇴적층의 총 두께, 매우 얇게 분포하는 제4기 표층 단위(unit), 심부 제4기 퇴적층의 4가지 지질학적 기본 요소 정보를 제공한다. 이 지도는 GIS 기반으로 1998년도에 재 발간 되었고, 표층 퇴적물은 특징에 따라 여섯 단위(till, coarse-grained stratified sediment, fine-grained stratified sediment, organic-rich sediment, patchy Quaternary sediment, alluvium or colluvium)로 구분하였다. 표층보다 아래의 제4기 퇴적층(subsurface sediments)에 대한 층서적 정보와 퇴적 연대는 데이터가 충분하지 않기 때문에 제공되지 않는다. 심부 제4기 퇴적층은 퇴적층의 두께에 따라 다섯 단위로 구분하여 서로 다른 색깔로 지도에 표시된다. 또한 미국 지질조사소에서는 제4기층 표층에 남겨진 단층 흔적을 중심으로 제작된 “The Quaternary Faults

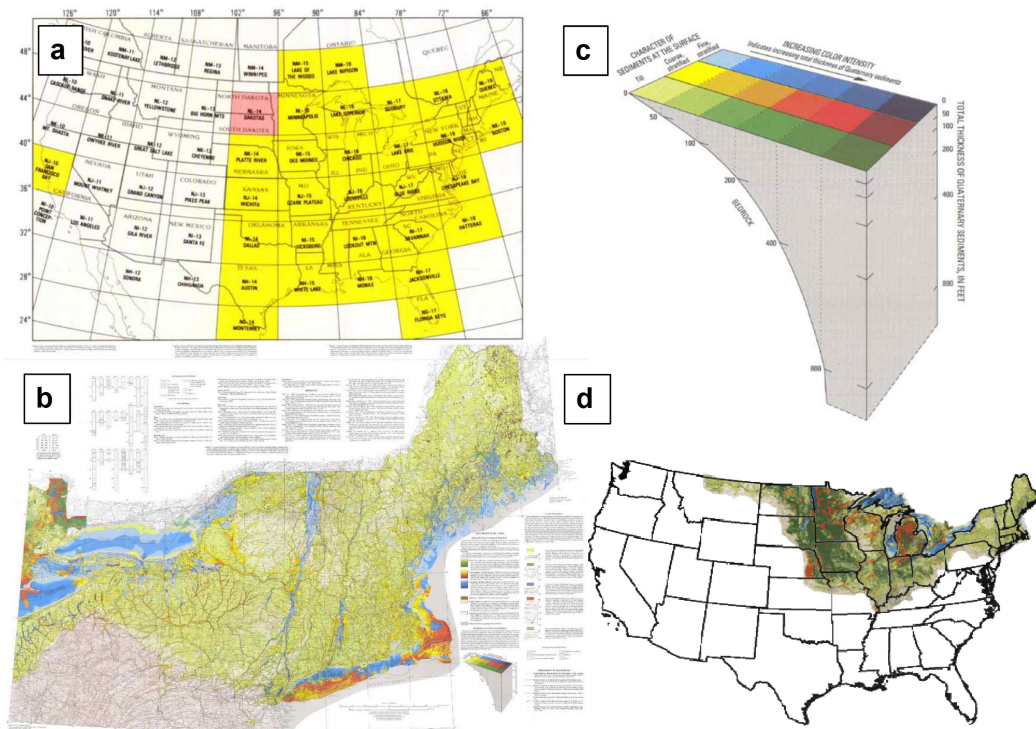


Fig. 4. Map (a) Shows the location of the Quaternary Geologic Map and other published maps in the Quaternary Geologic Atlas of the United States in yellow (Quaternary geologic map of the Dakotas, 2020). Map (b~d) shows the thickness and character of Quaternary sediments in the glaciated United States East of the Rocky Mountains. Quaternary deposits are included both glacial and glacially related sediments, and any overlying Holocene sediments. Map colors are assigned on the basis of the surficial geologic unit. The total thickness of Quaternary sediments (c) is shown by the intensity of these colors Map showing the thickness and character of Quaternary sediments in the glaciated United States (Map showing the thickness and character of quaternary sediments in the glaciated United States East of the Rocky Mountains, 2020).

and the National Seismic Hazard Maps” 지도도 제4기 주제도의 형태로 제공하고 있다. 이러한 제4기 주제도는 토목공학, 활성 단층 추적, 지표 변형 및 위험도 예측 등에 활용되고 있다.

2.4 호주 제4기 지질도

호주는 각 주의 지질조사소를 중심으로 2000년대 초반에 해안 제4기 지질도(coastal Quaternary geology map)를 발간하였다. 이는 호주의 산업시설과 주거시설들이 대부분 해안을 따라 분포하기 때문에 해안의 제4기 지질 중요성을 더욱 부각시킨 주제도이다. 모든 지질도는 디지털화 되어 유료로 제공되며 1:10만, 1:5만, 1:2.5만 축척의 지질도가 제공된다.

지질도는 라이다 수치 고도(LiDAR DEM) 데이터, 항공 이미지, 토양 자료, 지하수 공 데이터(water bore database) 등의 자료를 바탕으로 제4기 지질 분포를 나타낸다. 범례는 크게 다섯 가지(alluvial plain system, coastal barrier system, estuarine plain system, subaqueous system, anthropogenic)로 구분되며 각각은 세부적 암상과 지형 및 퇴적 환경에 따라 세분된다(그림 5). 지도에 표시되는 단위는 표층의 퇴적 환경을 나타낸다. 또한 일부 시추공의 자료와 제한된 현장조사를 통하여 얻어진 지질 정보도 함께 제공한다. 이러한 제4기 지질도는 특별히 지질 공학, 재해 예측, 지하수, 해안 침식 및 제방붕괴, 토양 산성화 연구에 활용되고 있다.

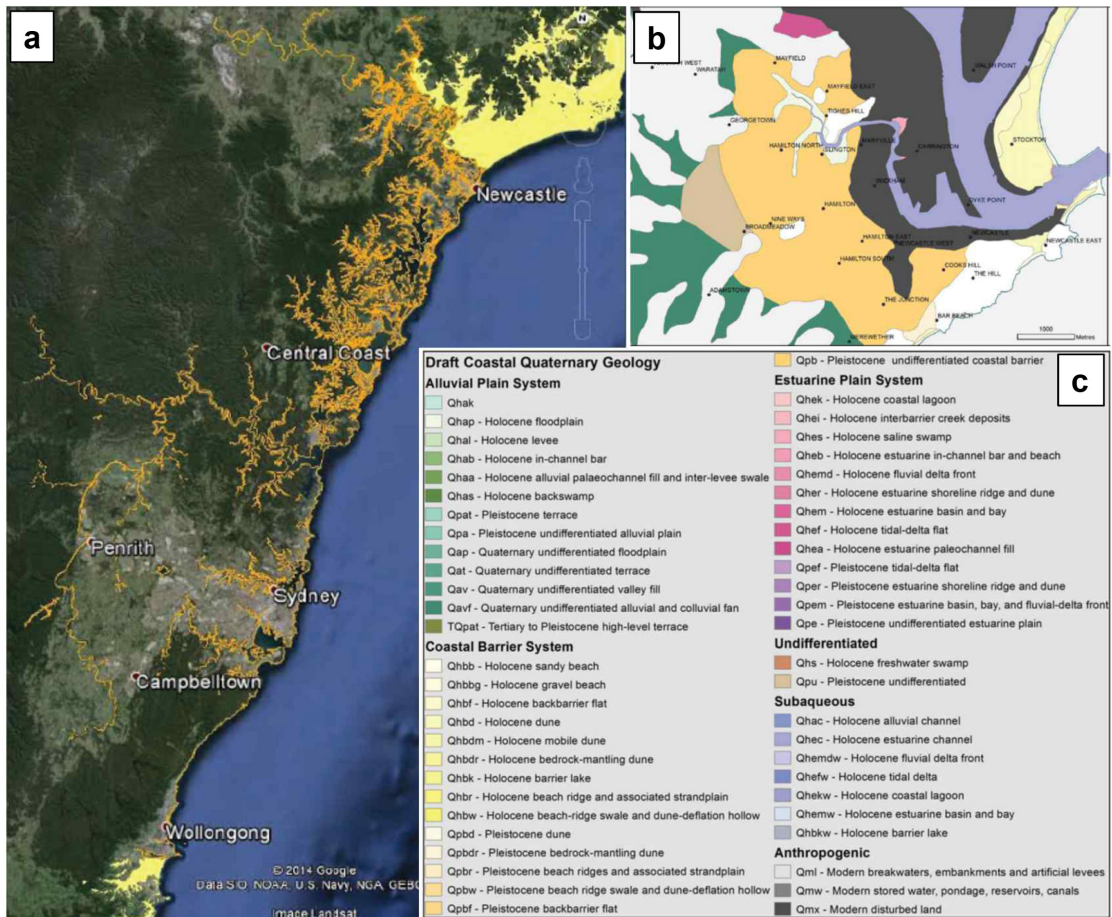


Fig. 5. Detailed (1:25,000 scale) mapping of the coastal Quaternary deposits of New South Wales region, Australia. a: Google Earth image of the Newcastle to Wollongong coastal Quaternary mapping area. b: an example of 1:25,000 Quaternary mapping for the Newcastle city area. c: Legend for new Quaternary geological mapping in NSW (Troedson and Hashimoto, 2008).

3. 한반도 제4기 지질도 제작 사례

한반도의 제 4기 지질 면적은 국토의 약 13%에 해당되며, 남한의 생활/산업기반시설 약 80%가 제4기 지질 영역 위에 분포한다. 1:25만 축척 지형도를 기준으로 국내 제 4기 지층은 크게 하성 기원 퇴적층(약 60%), 해성 기원 퇴적층(약 30%) 그리고 산지의 곡간부와 분지에 퇴적되는 제4기층(약 10%)으로 나뉜다(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2014). 2010년대 이전까지는 제4기 지질 연구가 특정 이슈(기후변화 및 고환경 복원, 고고 지질 등)에 집중되었고, 2010년대부터 제4기 지질의 지질 연대, 퇴적 층서, 형성 조건들에 대한 연구와 더불어 이를 활용한 제4기 지질도 작성 사업이 한국지질자원연구원을 중심으로 본격적으로 시작되었다. 한반도 제4기 지질도는 제4기층 분포지역에 대한 제4기 지질의 기본 정보를 제공하여 국토 활용과 과거, 현재 그리고 미래의 지표 환경 변화를 추정 또는 예측하는데 중점을 두었다. 또한 제4기 지질도 제작은 경제적 측면이나 정책적 측면에서 활용 가능한 국토 기본 정보를 제공함을 그 목표로 하였다. 한반도 제4기 지질도는 “영산강 유역의 제4기 지질 계통 확립과 지표환경변화연구”(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2014: GP2012-004-2014(3)), “한반도 중서부 제4기 층서 및 환경변화 연구”(금강, 만경강, 동진강 유역) (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2016: GP2015-015-2016(2)), “국토 대단층계(양산단층 중부지역) 위험요소 평가 연구”(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2020)를 통해 제작된 바 있다. 2014년과 2016년 사업에서는 디지털화된 도면이 시범 제작되었고, 국토 대단층계(양산단층 중부지역) 위험요소 평가연구사업에서는 제4기 지질 정보를 포함한 단층 주제도로 도면이 제작되었다. 제4기 지질도 제작과 관련된 내용은 Kim and Kim (2015), Lee *et al.* (2016), Kim *et al.* (2019) 논문에서 소개된 바 있다.

3.1 영산강 유역 제4기 지질도 제작

영산강 유역의 제4기 지질도는 2012년도부터 3년간 한국지질자원연구원에서 제작되었으며 전라남도 장성에서 목포에 이르는 영산강 유역에 분포하는 제4기 퇴적층을 대상으로 1:5만 축척으로 제작되었

다. 이 곳의 제4기 지질도 제작 과정은 다음과 같다. 먼저 1:5만 지질 도폭에 표시되어있는 충적층(Q_a)을 확인하고 이를 제4기와 제4기 이전(pre-Quaternary) 경계로 설정하였다. 지도에 표시된 충적층은 야외 지표지질조사를 통하여 제4기 퇴적층을 최종적으로 확인하였다. 또한 지형조사 자료, 물리 탐사 자료, 시추공 검증 자료 분석을 통하여 제4기 퇴적층의 수평적 분포 해석을 실시하였다. 시추 시료 분석을 통하여 층서, 퇴적 연대, 지화학, 미고생물 분석 등을 실시하여 생층서, 시층서 및 지화학 층서 개념의 충적층 분포 해석을 실시하였다. 시추자료들을 바탕으로 충적층 심도 분포 및 퇴적 환경을 프로파일 형태(profile type)의 제4기 지층으로 분류하여 제4기 지질 주제도 및 설명서를 제작하였다. 표식 단면 층서와 시추 자료들을 바탕으로 한 충적층의 퇴적 환경은 크게 해성, 하성, 선상지성, 사면 봉적 기원으로 나뉘며 절대연대측정을 통하여 이를 시기별 프로파일 형태로 구분하였다(그림 6; Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2014).

3.2 금강, 만경강, 동진강 유역 제4기 지질도 제작

금강, 만경강, 동진강 유역의 제4기 지질도는 한국지질자원연구원에서 2015년도부터 1:5만 축척의 제4기 지질 층서 및 퇴적 환경 기반으로 제작되었다. 연구 지역은 1:5만 지형 도폭 기준으로 한산, 서천, 익산, 군산, 정읍, 부안에 해당된다. 이 지역의 지질도 제작 순서는 다음과 같다. 먼저 야외 지표 지질 조사를 통한 충적층 분포를 확인하였고 이를 바탕으로 제4기 퇴적층 경계 및 노출된 제4기 퇴적층을 구분하였다. 지질도 작성을 위하여 현재의 지형은 다음과 같이 다섯 영역(domain)으로 설정하였고 이는 다음과 같다. (1) colluvial domain: 중력과 유수에 의한 퇴적, 상대적으로 경사가 급하며 최대 안식각으로 퇴적된 퇴적층, (2) alluvial domain: 퇴적물이 주로 유수에 의해 퇴적되며 지형적으로 부채꼴 모양 퇴적층, (3) fluvial domain: 하천 유역의 수량이 많은 지역에서 형성된 퇴적층, (4) transition domain: 두가지 환경이 교차하는 위치의 퇴적층, (5) marine domain: 해수면 상승에 의하여 퇴적된 지역의 퇴적층으로 구분된다. 퇴적 단위 구분은 퇴적물 조직을 근거로 암상층서단위(lithostratigraphical unit)를 설정하고 이들을 조합하여 프로파일 형태로 구분하

였다. 퇴적물 연대측정에는 ^{14}C , 광여기루미네선스(OSL: Optically Stimulated Luminescence), ^{137}Cs 그리고 ^{210}Pb 이 활용되었다. 또한 퇴적물 시추 조사 결과를 바탕으로 시추공 자료를 이용한 단면도 기반의 도심 지질용 3D 모델링 지질 주제도가 시범적으로 제작되었다. 이러한 주제도 제작은 도심 지역의 지질 정보를 3D 지질 모델링을 통하여 구현함으로써 도시 지역 등 제한된 지표지질자료를 가진 지역의 지질 정보 분석에 적합한 방법이며 국내에서는 처음 시도된 제4기 지질 주제도이다(그림 7; Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2016; Kim *et al.*, 2019).

3.3 양산단층 중부지역 제4기 지질도 제작

국토 대단층계 위험요소 평가 연구 사업(한국지질자원연구원, 2017~2019)의 일환으로 2017년 경주 지진이 발생한 지역을 중심으로 안강에서 연양까지 남북 방향으로 약 50 km, 동서방향으로 약 4 km에 해당되는 지역을 대상으로 제4기 지질도를 제작하

였고 그 바탕 위에 단층 요소들을 구분하여 표시하였다. 이 지역의 제4기 지질도 제작을 위해 먼저 제4기 미고화 퇴적층 분포 및 지형 특성을 조사하고, 고지도 및 고해상도 항공사진 분석을 통하여 제4기 지질 및 지형(하천환경, 하안단구) 분포 특성을 파악하였다. 고지도 및 항공사진을 통하여 파악된 지형적 요소는 현장 확인을 통하여 그 유무를 확인하였으며, 제4기 동안 형성된 지층을 확인하여 그 퇴적 환경을 유추하였다. 제4기 지질도는 지표 약 1 m 깊이의 퇴적 환경을 파악하여 지도에 표시하는 제4기 표층도(surficial/superficial geology map) 컨셉으로 제작되었다. 기반암 위에 분포하는 지표 하부의 퇴적층 해석을 위하여 광범위한 미고화 퇴적층 시추를 실시하였으며 제4기 퇴적층의 사진 자료와 주상 자료가 제작되었다. 또한 ^{14}C 및 OSL 연대측정법을 통하여 퇴적층의 퇴적 시기를 측정하였다. 시추코어로부터 얻어진 정보를 바탕으로 시추 지점을 중심으로 퇴적층의 층서 및 절대 연대, 기타 지화학 데이터들이 제공되었고 기반암 위에 분포하는 제4기 미고화

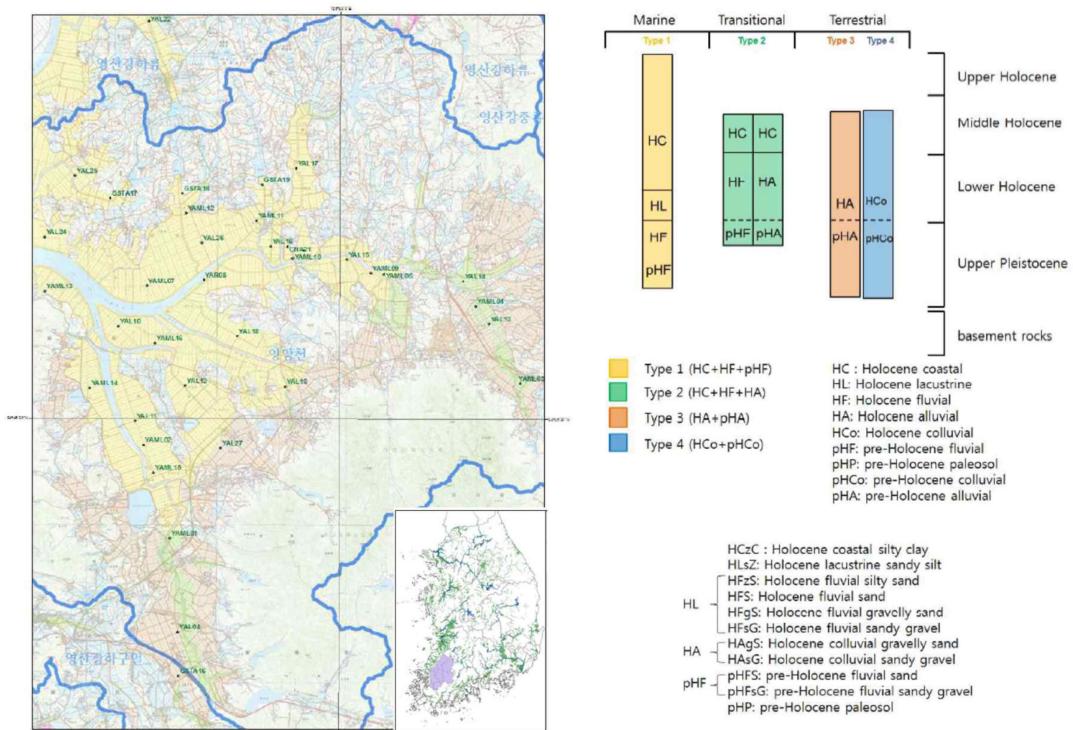


Fig. 6. Quaternary geologic map of the Yeongsan River area, an example of 1:50,000 Quaternary mapping for the Yeongam area (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2014).

퇴적층의 3차원적인 분포 현황과 퇴적 시기가 구별되었다(그림 8a; Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2020). 또한 시추코어로부터 획득한 퇴적층 분포 심도를 서로 다른 색상으로 표시하여 심도 분포도를 제작하였다(그림 8b; Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2020). 최종적으로 제4기 주제도에서 퇴적층은 크게 봉적 기원 퇴적층, 선상지성 퇴적층, 하성 퇴적층으로 구분된다. 먼저 경사면에 분포하는 봉적 기원 퇴적층(colluvial deposit: Co)은 중력 및 유수에 의해서 이동되는 퇴적환경으로 형성된 것으로 해석된다. 봉적층보다 낮은 고도에 분포하는 선상지 환경의 퇴적층은 고도별로 구분되는데 크게 상부 선상지(upper alluvial fan: Afu), 중부 선상지(middle alluvial fan: Afm), 하부 선상지(lower alluvial fan: Afl) 퇴

적층으로 구분되며, 상중하의 경계가 없는 단일 선상지 환경의 경우 alluvial fan deposits (AF)으로 구분된다. 또한 선상지 하부에 표고차가 크지 않은 매우 넓게 분포하는 퇴적층을 선상지 평원(alluvial plain: Ap)으로 해석하였다. 제4기 충적층의 분포상 최하부에 해당되는 퇴적층은 하성 기원의 퇴적 환경으로 해석되며 크게 현생 하성(modern fluvial)과 고하성(paleo-fluvial) 환경으로 구분하였다. 하성 환경은 다시 하천 퇴적층(modern fluvial channel deposit: MFc)과 범람원 퇴적층(Modern floodplain deposit: MFp)으로 구분하였다. 반면, 퇴적층만으로는 환경 해석이 어렵지만 하천 환경의 지형적 특성들이 관찰될 경우 하성 기원의 단구 퇴적층으로 구분하여 상대적으로 낮은 고도에 분포하는 하성 기원 퇴적층(fluvial terrace 1: paleo-fluvial channel

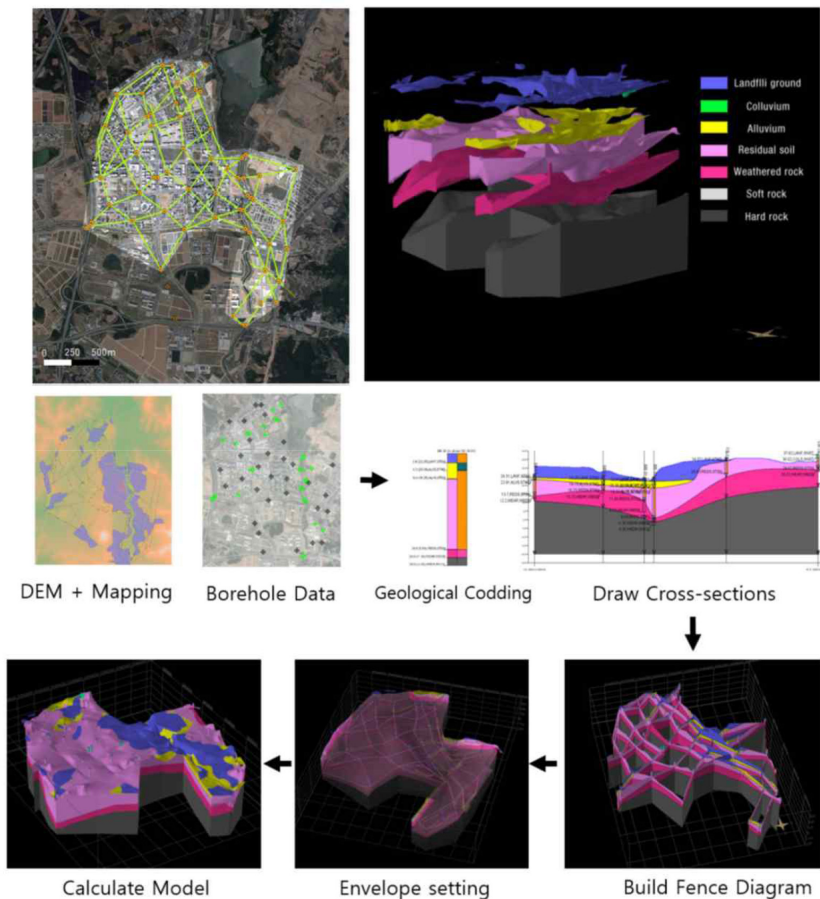


Fig. 7. 3D modelling area with the borehole data points on a satellite image of the Jeonju innovative city, and schematic description for modelling processes (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2016; Kim *et al.*, 2019).

+ paleo-natural leavee: Ft1)과 상대적으로 높은 고도에 분포하는 하성 기원 퇴적층(fluvial terrace 2: paleo-floodplain: Ft2)으로 구분하였다.

4. 토의 및 결론

4.1 일반적인 제4기 지질도 제작 과정

제4기 지질도 제작을 위한 연구 지역 제4기층 분포 범위 조사는 고지도 및 수치 지형도, 항공 사진 및 드론 영상 분석 등으로 수행한다. 영상 자료를 통해 확인된 제4기층은 야외 조사를 통하여 그 존재 유무를 최종적으로 확인하고 제4기층 분포 범위를 확정한다. 확정된 분포 범위 내의 제 4기층은 지형 및 퇴적 환경 특성에 따라 구분하는데, 야외 조사를 통하여 노두에서 퇴적층을 관찰하거나 핸드 오거(hand auger)를 이용하여 표층을 덮고 있는 퇴적물들을 채취하여 퇴적 환경별 단위로 구분한다. 제4기층 분포 지역을 대상으로 천부 및 기반암까지 도달하는 심부 시추를 실시하여 미고화 퇴적층을 채취하고 주상도 작성 및 층서 해석을 실시한다. 주제도 특성에 맞는 프록시(proxy)를 정하여 프록시 분석 및 퇴적층을 대상으로 절대 연대측정을 실시하여 형성 연대를 구

분한다. 층서 및 프록시 분석, 연대측정 결과를 바탕으로 암층서 및 시층서를 나누며, 각각의 주제도 특성에 맞게 지도에 지질 특성 별 범위를 표시하고 이를 도폭설명서에 자세히 서술한다.

4.2 제4기 지질도와 토양도의 차이점

토양도는 제4기 지질도와 연구 영역 및 개념이 유사하기 때문에 제4기 지질도와 혼용되어 사용되기도 한다. 하지만 토양도는 만들어진 목적이 제4기 지질도와는 다르다. 토양도는 지역별 토양 특성을 주제도 형식으로 나타낸 지도로써 토양 환경 변화 예측, 자연재해 영향 분석, 생태조사, 작물 생산 등을 위한 정보 제공에 활용되며, 그 특징들은 다음과 같다. 토양도는 토양 조사 결과로 분류된 토양 단위의 범위를 지도화하여 나타낸 것으로 1:5만 축척 개략 토양도와 1:2.5만 축척 정밀토양도가 있다. 농촌진흥청 토양환경정보시스템에서 제공하는 토양환경지도는 분포 지형에 따라 산악지, 구릉지, 산록경사지, 곡간지/선상지, 해성평탄지, 하성평탄지, 고원지, 홍적대지, 용암류대지, 용암류 평탄지로 구분되며, 토양 특성에 따라서는 충적층, 홍적층, 충적 봉적층, 봉적층, 잔적층으로 구분된다. 제4기 지질도와 차이

Legend

- Class A
- Colluvial deposits (slope sediments): Co
 - Un-classified Alluvial deposits + Alluvial fan deposits : AF
 - Alluvial fan (lower level) : AfL
 - Alluvial fan (middle level) : Afm
 - Alluvial fan (upper level) : Afu
 - Alluvial plain : Ap
 - Modern fluvial channel deposits(1950): MFc
 - Modern floodplain deposits(1950): MFp
 - Fluvial channel Deposits :Fc
 - Floodplain Deposits(natural leavee) :Fp
 - Fluvial terrace 1 (paleo-fluvial channel-natural leavee) : Ft1
 - Fluvial terrace 2 (paleo-floodplain) : Ft2

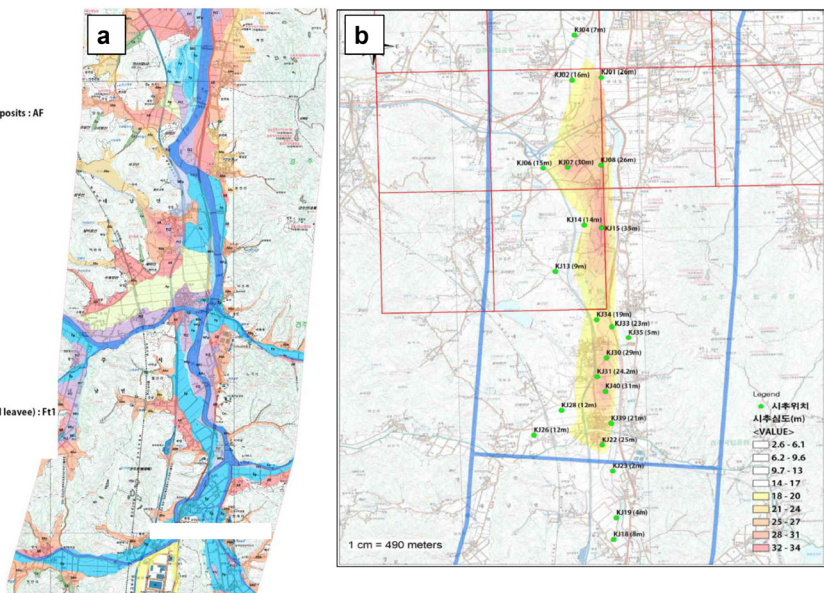


Fig. 8. Quaternary geologic map of the central region of the Yangsan fault, a: an example of 1:50,000 Quaternary mapping for Gyeongju area, b: Quaternary sediment thickness model (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2020).

점은 토양도는 기반암이 풍화되어 토양화된 표층 지역과 토양의 두께가 1 m 이내인 지역도 토양도의 조사 대상 지역에 포함되며 시간 개념이 없는 현재의 토층 환경만을 나타내는 반면, 제4기 지질도는 바람, 빙하, 중력, 유수 등에 의하여 운반된 퇴적물들이 약 1 m 이상의 두께로 쌓인 지역만을 연구 대상으로 하며 형성 시기에 대한 시간 개념이 존재한다. 또한 토양도에서의 단위 특성은 현재 지형 기반이 주를 이루며 토양의 구성 성분과 토색 위주로 분류되는 반면, 제4기 지질도에서는 퇴적물의 퇴적 환경에 따른 퇴적 구조 및 물리적 특성들이 반영되어 세분된다.

4.3 국내 제4기 지질도 제작 방식

국내의 제4기 지질도 제작 방식은 프로파일 형태와 표층도 형태로 크게 구분된다. 먼저 프로파일 형태의 지질도는 영산강, 금강, 만경강, 동진강 유역의 제4기 지질도 제작에 사용된 방식으로 기반암 위에 분포하는 미고화 퇴적층의 층서별 단위를 설정하고 이들을 조합하여 프로파일 형태로 나타낸다. 이는 퇴적상 조합(facies analysis)과 유사한 개념으로 여러 개의 퇴적 단위를 결합하여 하나의 환경 타입으로 제4기 지질도에 구현하는 방식이다. 장점으로는 기반암 위 제4기층의 전반적인 지질 정보를 구체적으로 전달할 수 있으며, 암층서 뿐만 아니라 연대층정을 통한 시층서, 지화학 분석을 통한 지화학 층서, 미고생물 분석을 통한 생층서 등 지질 주제도 개념의 지질도 제작이 가능하다는 점이다. 또한 다수의 시추공 자료를 활용한 3차원 지질 분포도(모델) 작성이 가능하며 이는 도심 지역 등 현장 조사가 힘든 지역의 지질도 작성에 적합하다. 단점으로는 제4기 충적층이 대부분 지하에 놓여 있기 때문에 시추를 통한 층서 해석이 필수적인데, 프로파일 형태의 지질도 작성은 매우 많은 시추공 정보를 필요로 하며 기반암 위에 분포하는 미고화 퇴적층 전체를 시추하는데 많은 시간과 비용이 소요된다는 점이다. 또한 프로파일 형태로 퇴적층 단위를 조합할 때 퇴적층의 두께가 상대적으로 얇은 경우엔 단위로 구분이 힘들며 이를 프로파일 형태로 조합하기도 어렵다. 한편, 시추 조사에서의 문제점들은 기존 엔지니어링 시추에서 생산된 자료들을 분석하여 일정 부분 보완이 가능하다.

표층도 형태의 제4기 지질도 제작은 국내(양산단

층 중부지역) 뿐만 아니라 국외의 제4기 지질도 제작에 일반적으로 사용되는 방식으로 지표면에서의 지형층서(morphostratigraphy) 만을 나타낸다. 이는 표층 약 1m에 해당하는 퇴적층의 퇴적 환경과 퇴적 물질 특성을 형태별로 구분하여 지도에 나타내는 방식이다. 이러한 방식은 실제 영상자료 분석과 야외 답사를 통한 지질도 제작이 주를 이루기 때문에 조사 시간과 소요 경비가 상대적으로 많이 들지 않는 장점이 있다. 또한 지진이나 단층 운동에 의한 지표 및 지형 변형 등에 대한 표층 정보의 제공이 용이하다. 그리고 퇴적 시기 측정이나 퇴적물의 프록시 분석 등 다양한 분석 기법을 필요로 하지 않는다. 반면에 표층도 형태의 제4기 지질도는 제공하고자 하는 제4기 지질 정보가 제한적이며, 인간 활동에 의해 지표가 변형된 지역의 경우 지질도 범위에 포함되지 못한다. 또한 실내에서의 영상자료 분석 및 야외에서의 지형-지표 지질 해석을 위하여 숙련된 전문 기술을 필요로 한다.

4.4 국내 제4기 지질도 제작을 위한 제언

4.4.1 혼합형 제4기 지질도 제작

이번 연구에서는 위에서 언급한 두가지 형태의 제4기 지질도 작성 방식 중에서 국내 환경에 적합한 혼합된 형태의 제4기 지질도 제작을 제안하고자 한다. 이는 기본적으로 표층도 형태의 지질조사가 우선시 된다. 야외 조사 시 조사자가 모든 조사 지역을 답사하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 조사 범위를 빠짐없이 도면화 하기 위하여 항공사진과 라이다 데이터를 이용하여 제작한 3차원 영상자료를 기본 자료로 활용하고 야외 조사 자료들을 추가하여 표층도 형태의 지질도를 제작한다. 또한 다양한 지질 정보 제공이 가능한 대표적인 제4기층이 분포하는 특정 지점들을 중심으로 시추 조사를 통하여 3차원 지하 단면 정보와 기반암 위에 놓여 있는 제4기층의 전반적인 분포 정보를 제공한다. 이는 새로운 시추 조사 자료와 기존 엔지니어링 시추자료들을 통합하여 제4기층 심도 분포 및 시기별 퇴적 양상에 대한 정보 제공이 가능하다. 이러한 방식은 제4기 지질 분포 지역 전체에 대한 시추 조사가 필수적이지 않기 때문에 시추 소요 시간 및 비용을 절감할 수 있으며, 선별적 시추 위치 및 퇴적 단면 별 다양한 프록시 기반 지하 정보 제공이 가능하다.

혼합형 제4기 지질도 제작은 지질도의 축척에 따라 개략 조사, 정밀 조사, 세부 정밀조사 등으로 나눌 수 있다. 1:100만 ~ 1:25만 축척 제4기 지질도는 개략 조사 위주로 항공사진 및 라이다 데이터 등을 이용한 실내 분석과 제한적인 현장 조사를 실시한다. 현장 조사 시 조사 지점(시추 지점) 간 거리는 대략 10 km 이내 간격으로 지질 분포를 파악한다. 또한 지질 분류 단위는 고차 분류 단위(환경 분류: 사면, 선상지, 하성, 호성, 해성 등)를 사용한다. 이렇게 제작된 1:100만 ~ 1:25만 축척 제4기 지질도는 개략적인 전국 단위 제4기 지질 파악을 통한 국가 기본 국토 활용 정책 및 중앙 및 도 단위 종합개발계획에 활용이 가능하다. 1:5만 축척 제4기 지질도는 연구 지역 내 제4기 지질 분포의 정밀 파악을 위하여 정밀 조사 위주로 진행하며 세부 분류 단위(환경 분류: 선상지, 충적 평원, 범람원, 삼각주, 자연제방, 하천, 호수 등; 퇴적물 분류: 자갈, 모래, 점토 등)를 사용하여 범례를 세분한다. 또한 정밀 라이다 데이터 및 항공 사진 분석과 정밀 현장 조사를 병행한다. 현장 조사(시추 조사)는 약 1~2 km 간격으로 지질 분포를 파악하며 선별된 시추 조사를 통하여 시료 채취 및 다중 프록시 분석(multi-proxy analysis)을 진행한다. 1:5만 축척 제4기 지질도는 지역별 토지 개발을 위한 기초 자료 뿐만 아니라 지역별 맞춤형 제4기 지질 자료 제공에 활용 가능하다. 1:1만~1:5천 축척 제4기 지질도는 세부정밀조사 위주로 진행하며 조사 지점 간 거리는 약 100~500 m 이내이다. 이는 홍수 범람 특성, 연약 지반, 액상화 등 주제도 개념의 지역 단위 특성을 고려한 지질도 제작에 활용 가능하다.

4.4.2 지질 정보 및 지질 범례 표준화

현재까지의 국내 제4기 지질도 제작 사례들의 경우 제4기 지질 정보와 지질 범례의 표준화가 이루어지지 않았기 때문에 지질정보로서의 이용 가치와 효용성이 떨어지며 사용자를 위한 다양한 자료 제공이 이루어지지 않았다. 제4기 지질 정보와 범례의 표준화가 이루어지지 못한 이유는 국내에서 처음으로 시도된 제4기 지질도 제작이어서 여러 조사자들에게 제작 방식 및 표준화의 중요성이 충분히 인식되지 못한 상태에서 제작이 진행되었기 때문이다. 그에 따라 지질 경계선, 층서 설정, 시대 구분 등이 서로 유기적으로 연결되지 못하였는데, 이러한 점들을 보

완하기 위하여 우선적으로 제4기 지질 정보 및 지질 범례의 표준화가 필요하다. 필수적으로 제공되는 제4기 지질 정보들은 표준화하고 GIS 기반으로 디지털화하여 서로 다른 지역의 서로 다른 조사자가 지질도를 작성하여도 공통 항목의 데이터를 수집하고 이를 토대로 표준화된 지질도가 작성되도록 하여야 한다. 또한 1:100만 표준 범례, 1:25만 표준 범례, 1:5만 표준 범례 안을 마련하여 지질 경계선 구분, 층서 구분, 색상 기재, 암상 기재 등을 표준화하여야 한다. 또한 야외 조사 기본 지침서를 만들어 표준화된 형식의 현장조사 및 노두 사진 수집과 표준화된 도폭 설명서를 제작하여야 한다.

4.5 제4기 지질도 제작 및 발간의 의의

앞서 제4기 지질도 관련 해외 사례에서 언급한대로 제4기 지질도 및 주제도는 크게는 국토 이용, 자원 분포, 자연 재해에 대한 기본 정보 제공을 그 목적으로 한다. 세부적으로는 토목, 지하수 개발, 지하수 오염, 산사태 예측, 활성 단층 추적, 지표 변형 및 위험도 예측, 해안 침식 및 제방붕괴, 토양 산성화 연구에 활용되고 있다. 국내에서의 제4기 지질도 제작은 학문적, 사회적, 경제적 측면에서 그 필요성과 의의에 대한 고민과 논의가 필요하다. 앞서 언급한대로 제4기 지질도는 제작되는 축척에 따라 제공되는 지질 정보와 활용 방안이 달라진다. 저축척(1:100만 ~ 1:25만)의 제4기 지질도는 전국 단위 제4기 지질 파악을 통한 중앙 및 도 단위 국가 기본 국토 활용 정책에 활용이 가능하다. 고축척(1:5만 ~ 1:1만)의 제4기 지질도는 지역별 현안 문제 해결을 위한 맞춤형 지질 정보 제공에 용이하다. 예로 지진으로 유발된 액상화 취약 지역이나 연약지반으로 인한 싱크홀 발생 예상지역들에 제4기 지질 분포 특성 정보를 제공할 수 있다. 예로, 2017년 포항 지진으로 유발된 액상화는 포항 지역을 덮고 있는 제4기층의 두께 및 토질에 대한 정보가 제공되지 않아 그 조사에 한계를 지녔다. 이는 제 4기 주제도 개념의 지질도 제작을 통하여 기반암 위의 퇴적층 두께 및 토질, 지하수 위치, 암반 위치 등의 지질 정보를 구체적으로 제공함으로써 액상화 취약 지역을 선별 할 수 있다. 도심지역에는 제4기층의 기존 시추공 정보를 활용한 3D 모델 기반의 도심형 제4기 지질도를 제작하여 지하 공간에 대한 지질 정보를 제공할 수 있다. 위의 예와 같이

수요처 발굴을 통한 대국민 서비스에 활용할 수 있는 맞춤형 제4기 주제도 개념의 접근이 필요하며 이는 사회, 경제적 측면에서 의의를 갖는다. 또한 제4기 지질도를 구성하는 요소에 속하는 제4기층 형성 시기, 형성 과정 및 발달사에 대한 다양한 정보들과 전국 단위의 시추 시료 확보 및 분석 자료의 데이터 베이스화는 학문적 측면의 의의를 가지며, 후속 연구들에 소요되는 시간과 예산을 줄이는 효과도 얻을 수 있다. 해외 사례에서 보듯이 제4기 지질도는 매우 다양한 형태로 발간되어왔고 사회적으로 그 필요성과 당위성이 이미 입증되고 있다. 국내에서의 제4기 지질도 제작은 오랜 역사를 갖는 암석 지질도(hard rock map)에 비하여 시작단계에 놓여 있다. 하지만 제작 방식의 정형화 및 표준화된 형태의 제4기 지질도 제작과 수요 중심의 다양한 맞춤형 제4기 지질 주제도 제작은 국토의 약 10% 이상 그리고 국민 생활 터전의 약 80% 이상에 해당하는 제4기 지질 분포 지역에 대한 양질의 지질 정보를 제공함으로써 공공 부분에서의 기여도를 높일 수 있을 것이며 제4기 지질 연구 분야의 국내외 인지도 제고에도 매우 큰 역할을 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원 기관고유사업인 “국토지질조사 및 지질도·지질주제도 발간(GP2020-003)”의 일환으로 수행되었습니다. 이 논문의 세심한 심사과 유익한 조언을 주신 편집위원 및 두 분의 심사 위원께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- British Geological Survey, 2020, <http://www.largeimages.bgs.ac.uk/iip/mapsportal.html?id=1004592> (October 15, 2020).
- Geology of Britain viewer, 2020, <https://mapapps.bgs.ac.uk/geologyofbritain/home.html> (October 15, 2020).
- International Quaternary Map of Europe 1:2,500,000, 2020, https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Sammlungen-Grundlagen/GG_geol_Info/Karten/Europa/Quartaergeologie/quartaergeologie_review.html (October 15, 2020).
- Kim, J., Lim, H.S. and Nahm, W.-H., 2019, Three-dimensional modelling of urban area based on the urban geological approach. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 333-342 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.K. and Kim, J.Y., 2015, A study on landform development and geomorphological mapping of the Jiseokcheon drainage basin. *Journal of the Korean Geographic Society*, 4, 69-84 (in Korean with English abstract).
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2014, Establishment of Quaternary geologic system and surface environmental change in the Yeongsan River area, 368 p (in Korean with English abstract).
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2016, Quaternary stratigraphy and environmental changes in central western Korea (the Geum, Mankyong, Dongjin River areas), 82 p (in Korean with English abstract).
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2020, Research on geologic hazard assessment of large fault system - focusing on central region of the Yangsan fault (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-Y., Kim, J.C., Kim, J.Y., Hong, S.S., Lim, J. and Nahm, W.-H., 2016, Profile types of Quaternary deposits in the Boseong River basin, the upper part of the Juam reservoir. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 315-331 (in Korean with English abstract).
- Map showing the thickness and character of quaternary sediments in the glaciated United States East of the Rocky Mountains, 2020, <https://pubs.er.usgs.gov/publication/i1970Ehttps://pubs.er.usgs.gov/publication/i1970E> (October 15, 2020).
- Quaternary geologic map of the Dakotas, 2020, <https://www.usgs.gov/media/images/quaternary-geologic-map-dakotas> (October 15, 2020).
- Troedson, A.L. and Hashimoto, T.R., 2008, Coastal quaternary geology - north and south coast of New South Wales. *Geological Survey of New South Wales, Bulletin* 34.

Received : September 18, 2020

Revised : October 30, 2020

Accepted : October 30, 2020