지오빅데이터 오픈플랫폼 모니터링단 최종 보고서

지오빅데이터 오픈플랫폼 바탕의 지질학·자연지리학 연구와 발전 방향

Ⅰ. 오픈플랫폼 활용 사례 및 활성화 제안

1. 제4기 환경변화 연구를 위한 지오빅데이터 오픈플랫폼 자료 활용

(1) 제4기 환경변화

1) 제4기

신생대 제4기는 신생대 제3기 이후 플라이스토세(약 260,000 yr BP~10,000 yr BP)와 홀로세(10,000 yr BP~현재)로 구분하며, 빙기와 간빙기가 반복적으로 나타나는 지질시대이다. 이 시기는 대형 포유류가 번성하고, 현생 인류의 조상이 출현하였다. 한반도는 울릉도, 독도, 제주도를 화산섬으로, 백두산과 철원 일대를 칼데라(천지)와 용암대지로 형성하였다. 최종빙기 동안 한반도는 한랭 건조한 기후로, 황해는 육상 환경, 동해는 호수 상태였기 때문에 육로를 통해 중국 또는 일본으로 이동할 수 있었다. 이때 최종빙기 중 가장 한랭한 시기를 Last Glacial Maximum(최종빙기 최성기, 마지막최대빙하기, LGM)이라 하며, MIS 2 또는 약 22,000 yr BP ~ 18,000 yr BP로 시기를 추정하고 있다. 특히 LGM 때 황해는 반원형 사막지대 또는 스텝의 건조한 환경이 나타났다(그림 1). 이후 하인리히 이벤트, 뵐링-얼러뢰드 온난기, 영거 드라이아스 등의 만빙기를 거치며 1만년 전 홀로세 초기는 기온이 상승하여 해수면이 상승하고 내륙까지 해안선이 들어오는 해진극상기였다. 한반도는 제4기 동안 충적층과 주빙하 지형, 하천지형, 해안지형 등을 형성하였으며, 충적평야, 삼각주, 선상지 등의 퇴적 환경도 일어났다. 인간은 이러한 환경에 적응하여, 플라이스토세 말의 구석기, 홀로세 초기의 신석기, 이후 현재까지 동안 다양한 환경변화를 겪었다.

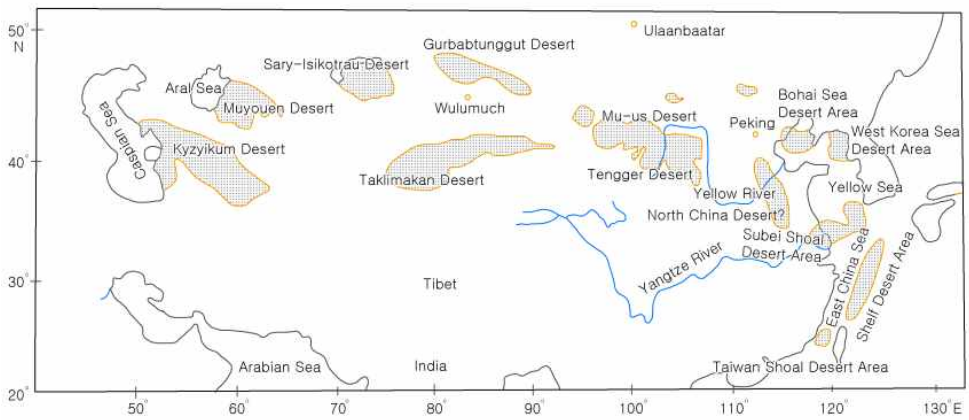


그림 1 LGM 시기 중앙아시아 반원형 사막 분포(Qin and Zhao, 1991)

2) 기후변화와 해수면 변동

제4기는 기후변동이 심하게 일어난 시기이다. 플라이스토세 동안 빙기와 간빙기가 반복되어 지금의 온난한 홀로세를 맞이하였다. 그림 2는 신제3기 플라이오세(Pliocene) 말 350만 yr BP부터 현재까지 유공충 등의 해양 퇴적물을 기반으로 산소 동위원소비를 조사하여 만들어낸 Marine Isotope Stages(이하 MIS) 그래프이다. 유공충의 $\delta^{18}O$의 비율이 높을수록 기온이 낮고, 비율이 낮을수록 기온이 높다. 이를 알프스 빙기에 적용해보면, MIS 21-11은 귄츠 빙기(Günz), MIS 10은 민델 빙기(Mindel), MIS 8-6은 리스 빙기(Riss), MIS 4-2는 뷔름 빙기(Würm)이다. 특히 마지막 간빙기(Riss-Würm interglacial)는 MIS 5e(MIS 5), 최종 빙기 최성기(Last Glacial Maximum, 이하 LGM)는 MIS 2이다.

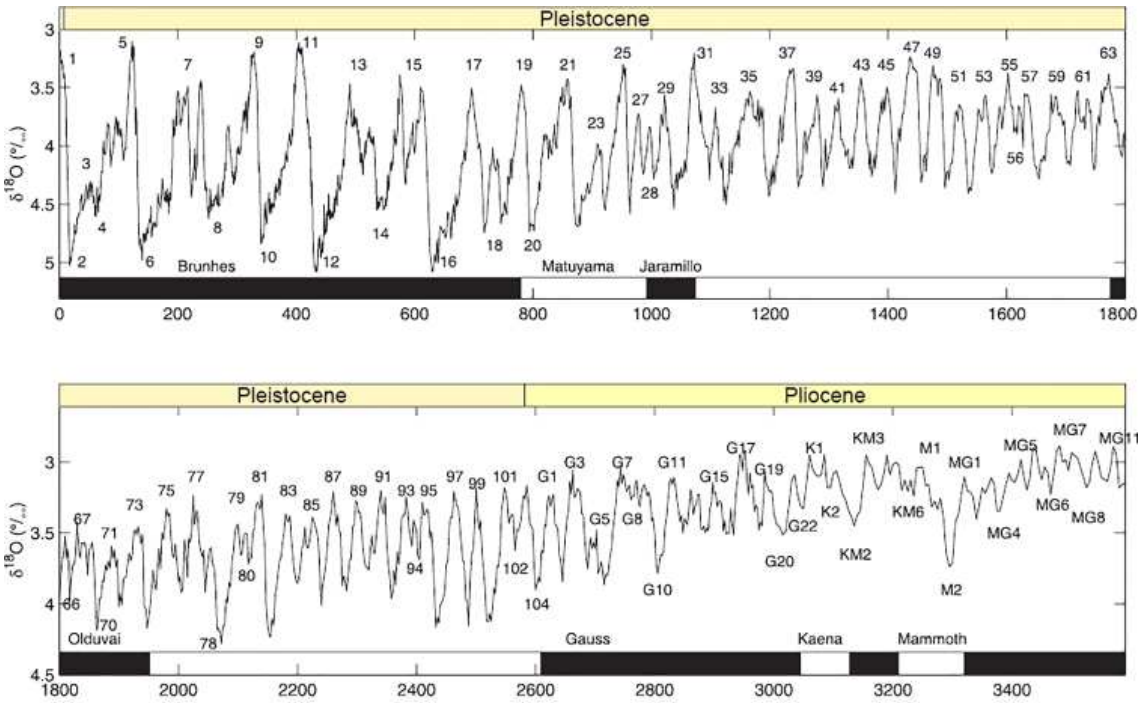


그림 2 Marine Isotope Stages(3,500 ka BP)(Lisiecki and Raymo, 2005; Gradstein, F. M *et al.* 2012)

LGM은 최종 빙기 가운데 가장 한랭했던 시기로 이후 기온이 상승하는 추세였지만, 만빙기에 접어들면서 크고 작은 변동이 있었다(그림 3; 그림 4). 영거 드라이아스기(Younger Dryas)는 12,000 yr BP~11,700 yr BP에 빙상 융해로 표층 해수의 밀도가 낮아지면서 북대서양의 열염순환 침강이 중단된 것이 원인이다. 멕시코 만류가 북쪽까지 흐르지 못하게 되면서 급격히 기온이 하강하였다. 1만 yr BP 경 홀로세가 시작되면서, 7,000 yr BP~6,000 yr BP 해진극상기인 기후 최적기를 맞게 되었다. 해수면이 급격히 상승하고, 가장 온난 다습한 시기였다. 그 후 로마 온난기와 중세 온난기를 거치며, 1300~1800년대는 한랭 습윤한 기후로 대기근을 불러일으킨 소빙하기(소빙기)가 찾아왔다. 이의 원인은 태양 흑점 수 변화, 화산 분화 등으로 추정한다. 기후변화는 이처럼 다양한 환경변화의 요인으로 작용하였다(김성중, 2008).

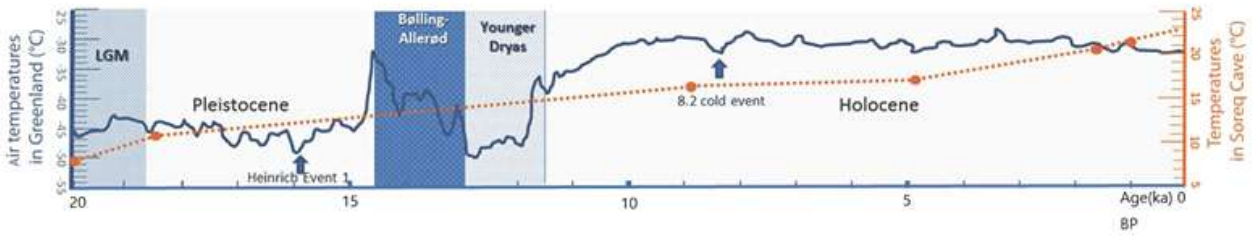


그림 3 LGM 이후 만빙기, 홀로세의 기후변화(Platt, D. *et al,* 2017 재구성)

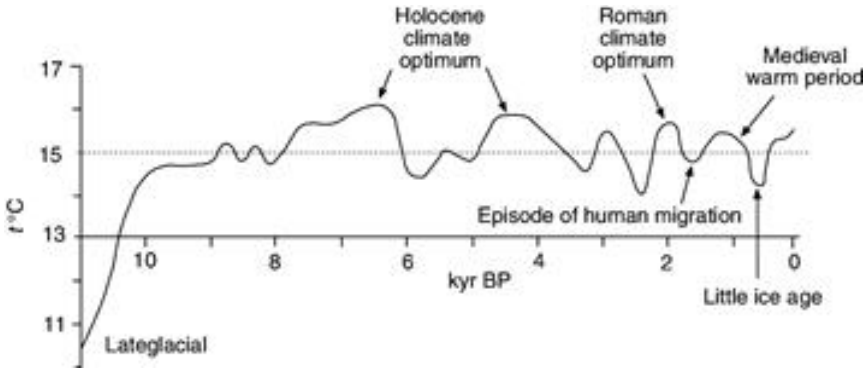


그림 4 영거 드라이아스 이후 홀로세의 기후변동(IPCC, 1990 재구성)

평균 기온이 상승하면서 최종 빙기 최성기 때 약 -140m(또는 -100m)이었던 해수면은 급격하게 상승하게 된다. 1만 년 BP 경 해수면 약 -30~-25m를 거쳐 현재 수준에 이르렀다. 이 시기는 7,000 yr BP 경 해안선이 내륙까지 최대로 해침한 해진극상기이다. 6,000 yr BP 이후 해수면 상승속도는 느려지고 미변동이 있었지만, 현재 해수면과 유사한 정체기이다.

그림 5는 지형학자에 의해 연구된 한반도 홀로세 해면변동을 나타낸 것이다. 이전부터 한반도의 해수면 변동은 해양학자, 지질학자, 지형학자 등에 의해 연구되었다. A와 B는 서해안의 일산과 평택 도대천의 해수면을 복원한 그래프이다. 서해안은 LGM 때 육상 환경이었으나 빠르게 해수면이 상승하여 7,000 yr BP 경 현재보다 약 -1m 낮은 고도까지 도달했다. 6,000 yr BP~5,000 yr BP 경은 현 해면보다 0.8m 정도 더 높았고, 3200 yr BP까지 거의 정체하거나 미하강으로 거의 안정된 시기였다. 2,300 yr BP의 해수면은 현재 수준이었고, 2,000 yr BP~1,800 yr BP에 다시 상승한다. 이는 홀로세 평균해면의 최고조로 현재보다 약 1.1m 더 높았다.

F와 G는 동해안의 그래프로, 동해안은 7,000 yr BP 경 -10m까지 도달했으며, 6,000 yr BP까지 빠르게 상승하여 현 수준에 이르고, 이후 미변동하였다. 하지만 C와 황상일, 윤순옥(2011)에 의하면, 동해안은 7000 yr BP 경 홀로세 해진극상기의 해수면은 현재보다 약 -1m 낮은 고도까지, 6,000 yr BP 현재 수준까지 빠르게 상승하여 도달하고 해안선이 현재보다 내륙에 도달한 환경이었을 것이다.

황상일·김정윤·윤순옥(2009; 2013)의 김해만(그래프D)과 비봉리 해수면 복원에 의하면 남해안은 5,000 yr BP까지 해수면이 상승해 해발고도 1.5m까지 도달했다. 이후 해수면은 안정되면서 4,000 yr BP경 하강하고 다시 3,500 yr BP까지 상승하는 미변동이 있었다. LGM 시기 해수면의 최저

위에 있으면서 해퇴현상이 일어났기 때문에 하천은 침식기준면에 대응하여 하천이 해퇴한 해안선까지 도달하기 위해 하방침식을 활발히 하였다. 이러한 상황은 하천 하류부의 침식곡을 형성하였고, 해진극상기 때 해수면이 빠르게 상승하면서 익곡을 만들었으며, 내만 환경을 이루게 되었다.

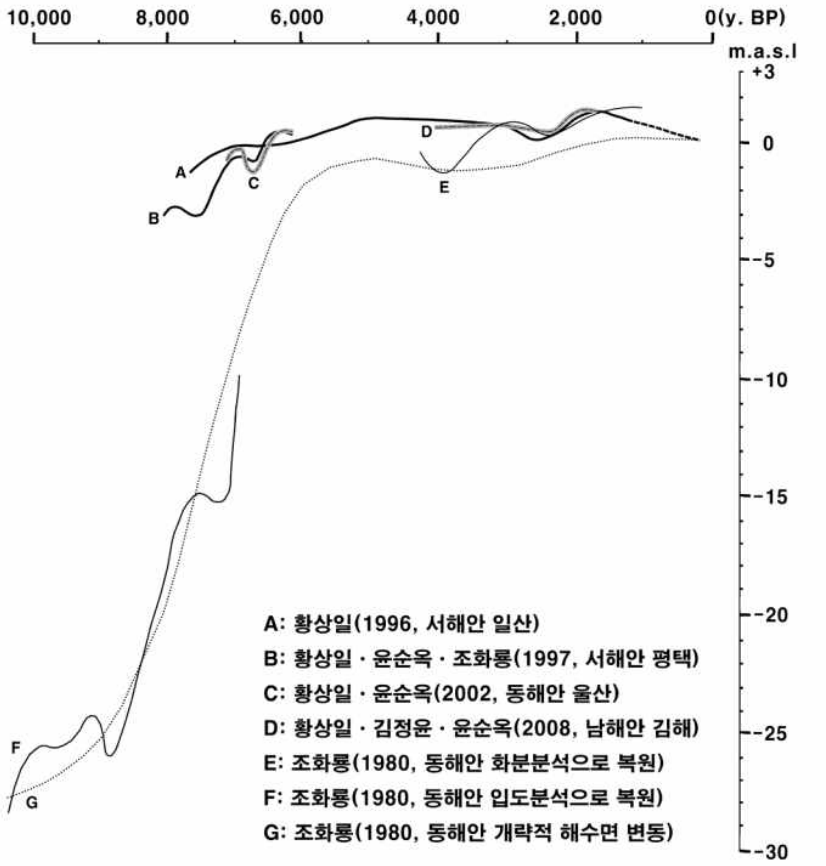


그림 5 한반도 해수면 변동 곡선(황상일·윤순옥, 2013)

2) 식생 변화

제4기학의 연구 방법 중 화분 분석(pollen analysis)이 있다. 화분(꽃가루)는 당시의 식생 환경을 알려주는 고환경 지시자(proxy)로서, 제4학기자, 지질학자, 지형학자에게 중요한 연구 대상이다. 제4기 동안 일어난 기후변화를 알기 위해 화분 분석을 통한 식생 분포와 변화는 기후변화에 중요한 연구자료가 된다.

플라이스토세 말 최종 빙기 최성기(LGM)는 대체로 한랭 건조한 기후였다. 앞서 언급한 스텝, 사막 환경의 육화된 서해안 대륙붕과 더불어 화분 분석을 통해 이러한 환경을 알 수 있다. 당시 제주도에 난대상록활엽수림이 나타나지 않는 것을 보아 한대전선은 제주도의 남쪽 해상을 통과했을 것으로 추정된다(윤순옥·황상일, 2009)(그림 6). MIS 2(LGM)의 연평균기온은 현재보다 10℃ 정도 낮았고, 식생 분포는 위도 10° 정도 남하하였다(피난처 가설에 의하면, 이 시기 식생은 대부분 현재의 자생지보다 남하하여 분포했고, 이후 홀로세에 기온이 온난해지면서 한랭한 곳에 자라던 식물은 다시 북쪽으로 이동하거나 수직적으로 이동해 고산식물로 남게 되었다.).

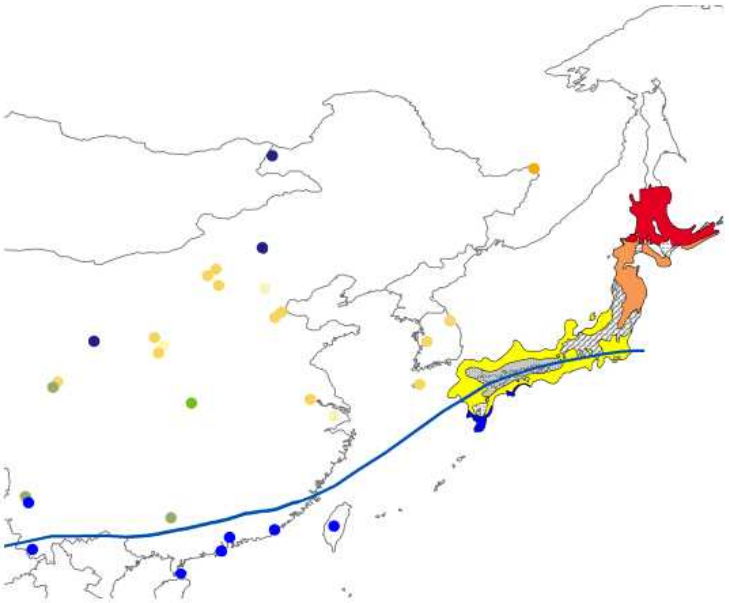


그림 6 추정 LGM 동북아시아의 한대전선 및 식생 분포(윤순옥·황상일, 2009)

이러한 환경은 토양이 얼고 척박한 상태로 목본 식물보다 초본 식물의 성장에 유리하였다. 윤순옥·조화룡(1996)의 경북 영양군 토탄층 화분 분석에 의하면, 플라이스토세 말 최종 빙기 동안 초본 식물인 쑥속(*Artemisia*), 오이풀속(*Sanguisorba*), 산형과(*Umbelliferae*), 벼과(*Gramineae*) 등의 비율이 높았다. 한편 목본 식물은 가문비나무속(*Picea*), 소나무속(*Pinus*; 오엽송), 자작나무속(*Betula*)이 대표적이었다. 특히 *Picea*는 한랭 건조한 기후의 산 능선에 잘 자라고, *Betula*는 한랭 습윤한 기후의 토양이 두꺼운 곳에서 잘 자라는 생태 조건을 지닌다. 동해안은 현재보다 10℃ 정도 낮은 것으로 추정되며, 오엽송과 가문비나무속, 자작나무속이 우점하였다. 이에 비해 서해안은 기온 차이가 크지 않았고, 건조한 사막이 나타났으며, 소나무속(이엽송, 오엽송)과 참나무속이 우점하였다. 따라서 한반도의 최종 빙기 동안 식생은 초본류의 비율이 상대적으로 높았고, 목본의 경우 침엽수 수종이 우세했다.

홀로세의 대표적인 수종은 참나무속(*Quercus*)과 소나무속(*Pinus*; 이엽송)이다. *Quercus*는 신석기의 주식 도토리가 열리며, 골짜기에서 주로 서식하고 토양층이 두꺼운 곳에서 잘 살아간다. *Pinus*는 극양수림으로 능선을 따라 분포하며, 척박하거나 바위산에서도 잘 자란다. 동해안은 소나무속과 참나무속이 번성한 반면, 상대적으로 습윤하고 지하수위가 높은 서해안은 오리나무속(*Alnus*)과 참나무속이 우점하였다. 기후변화는 수종의 변화를 일으켰다. LGM 때 번성한 *Picea*는 한반도 북부와 고산지대로 이동하고, 솔송나무속(*Tsuga*)과 너도밤나무속(*Fagus*)은 홀로세 시기 내륙에서 사라지고 현재 울릉도에만 남아 있다. *Quercus*는 홀로세 중기까지 우점종이었으나, 홀로세 후기 *Pinus*가 우점종이 되었다. 이는 한랭 건조한 기후가 나타난 시기에 *Pinus*의 비율이 높아졌다고 추측된다. 또한, 인간의 간섭으로 비율이 변화하였다. 농경 사회가 시작되면서 나대지를 형성하기 위해 벌목과 화재를 일으켰고, 조선 시대에는 금송령이 있었기 때문에 소나무가 우점종이 될 수 있었다. 이러한 시기에 *Pinus*의 화분과 메밀속(*Fagopyrum*), 벼과의 화분이 검출되어 인간의 간섭을 확인할 수 있다(윤순옥·조화룡, 1996; 이병석·유강민, 2001; 공우석, 2019).

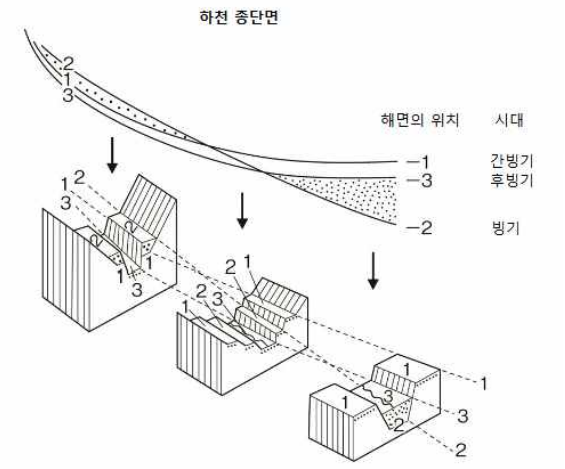
(2) 지질·지형 발달과 연구 사례

1) 지질·지형 발달

제4기 한반도는 화산활동과 기후변동이 활발했던 시기로, 지질학적으로 화성암과 홍적층, 충적층(퇴적 환경)이 형성되었다. 또 단층운동이 활발한 활단층은 주로 한반도 동남부 쪽에서 역단층, 주향이동단층 운동을 하였다. 이러한 흔적은 지질·지형 발달에 큰 영향을 주었다. 제주도, 울릉도, 독도, 백두산, 철원 한탄강 유역은 화산활동으로 형성된 암석이 분포하고 있으며, 화산 지형이 발달하였다. 하천은 침식·운반·퇴적을 하면서 다양한 지형을 만들어냈다. 하천의 운반작용으로 매적이 되면서 충적층이 형성되었고, 지난 간빙기, 빙기, 홀로세 동안 물리적(기계적), 화학적 풍화로 암석이 부서지면서 퇴적된 것과 높은 해수면 상태에서 퇴적된 해성층이 융기하면서 형성된 지형도 존재한다. 이처럼 제4기에 형성된 퇴적 지형은 홍적층, 충적층에 해당한다.

이전까지 한반도는 대체로 온난한 기후에 있었지만, 제4기 빙하기에 백두산을 포함한 높은 지역에 주빙하 지형이 발달했다. 기계적 풍화작용과 동결, 융해가 반복되면서 애추, 구조토 등이 만들어졌다. 특히 빙기에 하천이 산지의 암설을 운반하면서 평지와 만나면 더는 운반을 하지 못해 부채꼴 형태의 선상지를 만든다. 따라서 선상지는 자갈층이 발달했다. 또 화강암 풍화층은 주빙하 환경에 삭박되고, 핵석이 지표로 노출되거나 이동하여 토르, 암괴류 등이 되었다(권동희, 2020). 이처럼 빙하기에는 기계적 풍화작용이 지형 형성에 기여가 크다.

하천 지형은 기후변동과 해면변동의 영향을 받아 하안단구를 형성하였다. 그림 7의 하천종단면을 통해 알 수 있다. 마지막 간빙기는 온난 습윤한 기후로 유량이 많았다. 이러한 환경에서 하천 상류부는 침식이 활발하고 퇴적량이 적으며, 하천 하류부는 퇴적량이 많아 높은 고도의 충적평야를 이루게 되었다. 한랭건조한 최종 빙기에 하천 상류부는 기계적 풍화가 활발하여 암설이 퇴적되었고, 하류부는 낮은 해수면에 따라 낮은 고도의 하곡, 즉 침식곡이 만들어졌다. 홀로세 시기는 강수량이 많아 하천 상류부는 침식이 활발하고, 하류부는 범람하여 침식곡을 메운다. 이때 지난 간빙기의 범람원이 융기하면서 홀로세 충적평야보다 높은 고도를 이루게 된다. 따라서 하천 상류부에 빙기 때 형성된 퇴적층과 하천 하류부에 간빙기 때 형성된 퇴적층은 하안단구가 된다.



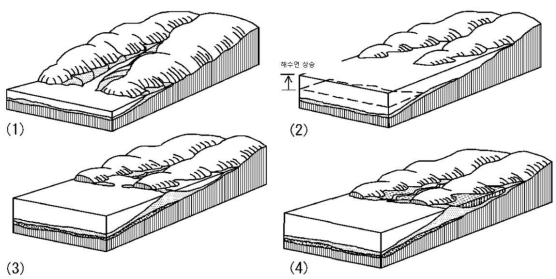


그림 7 간빙기·빙기·후빙기(홀로세)의 하천종단면도(Dury, 1959 재구성)(왼쪽)
그림 8 충적평야의 형성 과정(土質工學會編, 1966 재구성)(오른쪽)

특히 최종빙기 동안 낮은 해수면에 대응해 하천 하류부는 하방침식을 활발히 하였다. 하천 하류부는 강한 침식으로 하상을 깊이 파는 개석이 일어나 침식곡을 형성했으며, 하곡 주변에 하식애가 발달하였다. LGM 이후 홀로세 시기 해수면은 빠르게 상승하면서 해진 현상이 일어난다. 침식곡은 해진극상기 해수면 상승으로 익곡이 되었다. 이때 해면 상승속도는 하천 퇴적물 운반속도보다 빨랐기 때문에 해수는 내륙 깊숙이 진출하였다. 따라서 내만 환경이 형성되었다. 해안에 세립의 실트 해성퇴적물이 쌓이고 파랑에 의해 생긴 사주는 내만의 입구를 막아 석호를 형성하기도 한다. 이후 홀로세 중후기는 해수면의 정체기로, 하천 퇴적물 운반이 활발해지며 내만을 메우게 되었다. 이러한 매적곡은 충적평야가 성장하고 내만의 크기가 작아지게 된다(그림 8).

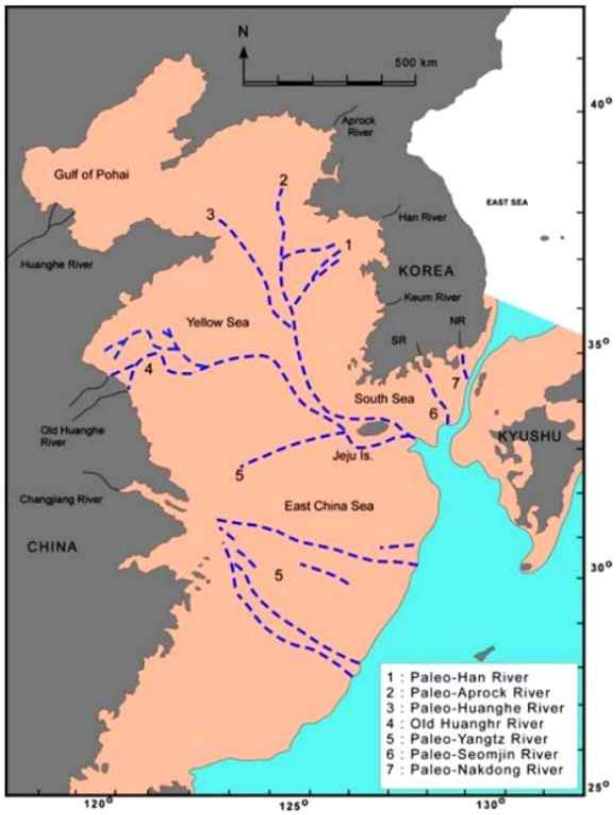
2) 남해안의 해수면 변동과 고지형 변화

최종빙기 최성기의 하천은 현재와 달리 해퇴 현상에 대응해 지금과 다른 모습을 하고 있었다. 육화된 대륙붕까지 하천의 하도가 형성된 것이다(그림 9). 개석곡은 현재 퇴적층의 하부 기반암의 형태와 유사하다. 특히 남해안은 해수면 변동과 당시의 환경을 추정하는 연구가 진행되었다. 해진극상기 남해의 바닷물은 하상이 깊게 파여 왜관-고령까지 영향을 주었다. 조화룡(1985)에 따르면, 낙동강의 하상의 기반암은 왜관 부근에서 해발고도 0m이며 하류부로 갈수록 그 고도가 낮아져 낙동강 하구부에서 기반암은 -80~-60m에 존재한다. 이후 낙동강 하구부의 퇴적조사를 통해 기반암의 해발고도가 -90~-55에 달하는 것으로 밝혔다(양재혁·조국래, 2011). 이처럼 하상은 매우 깊게 개석되어 충분히 내륙까지 해수의 영향이 있었을 것으로 판단된다. 따라서 퇴적상 분석, 연대측정, 규조분석 등을 통해 해수면 변동과 고지형 변화를 복원한 사례를 소개한다.

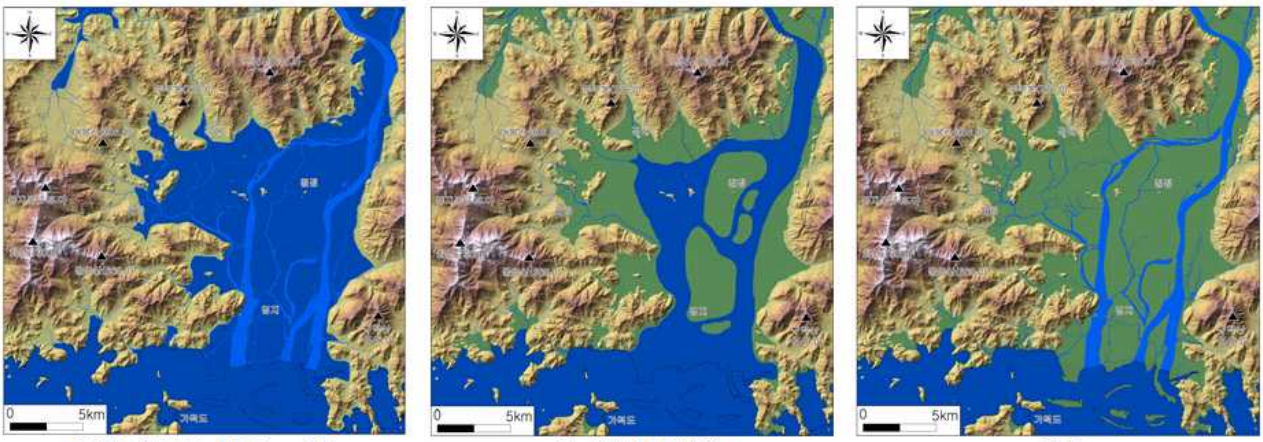
그림 10는 과거 내만의 형태를 이루었던 고김해만의 모습으로 현재 김해평야와 낙동강 삼각주가 관찰된다. 양산단층의 우횡변위 결과 김해만의 지형이 나타나게 되었다. 해진극상기 남해안의 해진 현상은 창녕 우포늪을 넘어 왜관까지 영향을 끼쳤다. 해수면 상승은 현재의 낙동강 하구는 물론 양산의 좁은 협곡을 통과하여 현재의 대산평야, 하남평야, 비봉리는 내만의 환경이었다. 이러한 바다의 흔적은 김해의 평지와 산지 경계부에서 발견되는 패총과 더 내륙에 있는 창녕 비봉리 유적에서 발견된 패총, 목선 등이다. 시간이 흐르면서 하천은 퇴적물을 운반하고, 고해면기에 비해 하중도, 삼각주가 생겨났다. 김정호의 대동여지도로 복원한 조선 후기의 김해만 경관은 아직 충분히 메워지지 않은 상태이다(김정윤, 2008). 낙동강 상류부의 산림벌채로 토지 이용을 하면서 퇴적 운반량이 많아졌고, 하천 범람은 퇴적물을 쌓아 자연제방, 배후습지를 꾸준히 형성해 충적평야를 이루게 되었다. 현재는 하천 퇴적물이 섬 중심으로 집적하여 하중도의 범위가 넓어지고, 해안선과 나란한 방향의 연안사주가 형성된 모습의 낙동강 삼각주를 볼 수 있다.

밀양의 하남평야 역시 과거의 내만 환경이었던 곳으로, 해진과 해퇴를 겪으면서 침식곡에서 익곡으로, 다시 하천 퇴적물의 운반으로 매적이 되었다(그림 11). 낙동강의 상류부와 중류부는 범람원의 크기가 작으나 남강과 합류한 후 창녕, 밀양, 김해, 부산 등에서 넓은 범람원이 발달하였다. 밀양 수산제 일대는 산지가 작고 충적평야가 넓어 지속적인 범람을 통해 퇴적물이 공급된다. 지난 7,000~6,000 yr BP는 해진극상기로 내만의 형태를 띠었고, 시간이 흐르면서 하천이 운반한 퇴적물이 쌓이면서 해수면 미변동이 일어났다. 2,300 yr BP는 석호 환경이 만들어졌고 이후 석호가 메워지면서 충적평야가 형성되었다(정무열, 2015).

창녕 비봉리는 신석기의 유적지로서 신석기의 목선이 발견되어 큰 주목을 받은 곳이다. 이곳에서는 특히 하게 내륙의 환경에서 굴패총과 도토리 구덩이가 발견되었다. 도토리 구덩이는 해수에 도토리의 떫은맛 성분인 타닌(tannin)을 제거하므로 구덩이의 고도 변화에 따라 해진, 해퇴를 추측할 수 있다. 퇴적상과 규조분석 결과 청도천의 하류부인 비봉리는 과거 내만의 환경이었고 시간이 흘러 석호의 환경이 되었고, 낙동강과 청도천의 영향을 받아 지속적으로 매적되면서 충적평야가 형성하였다(그림 12).



. 그림 9 LGM 시기 동아시아의 고하천 분포(공기수 등, 2015 재구성)



고해면기(6,000~1,800 yr BP) 조선 시대(1,800년대) 현재

그림 10 고김해만(古金海灣)의 모습과 낙동강 삼각주 발달 과정(김정윤, 2008)

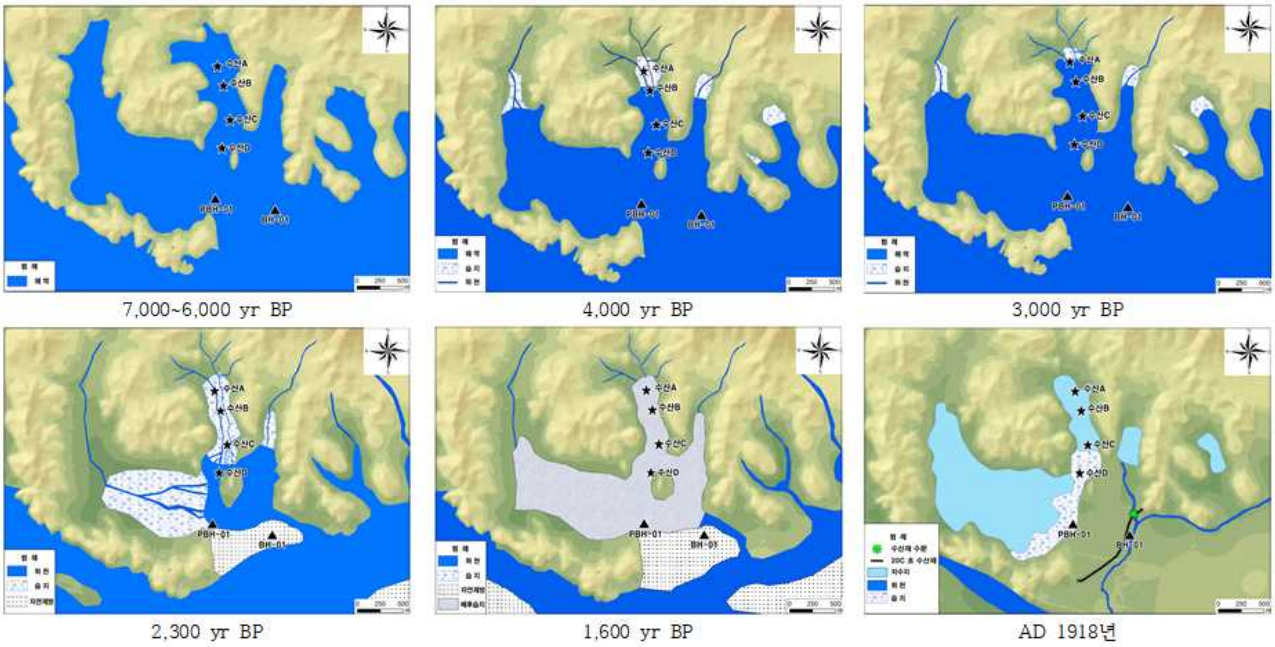


그림 11 밀양 하남평야의 발달 과정과 수산제(정무열, 2015)

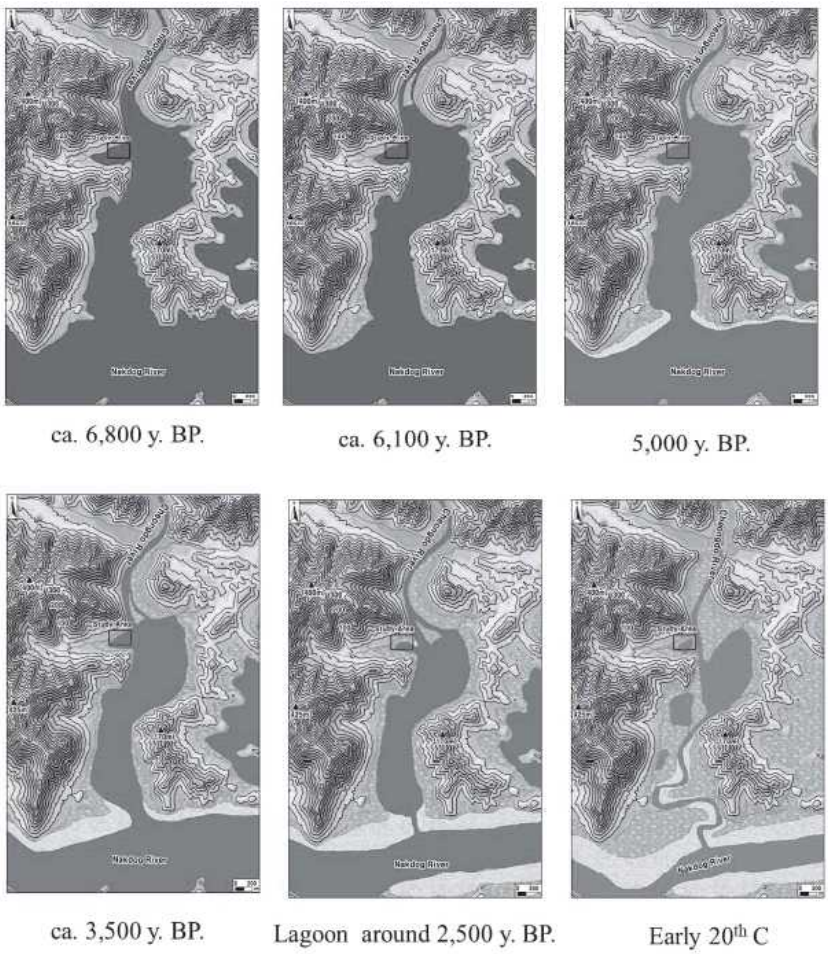


그림 12 고비봉만의 지형발달 과정(Hwang *et al.*, 2013)

3) 반구대 암각화의 특징과 제작 시기, 보존 문제

울주 대곡리 반구대 암각화는 국보 제 285호로, 대곡천 일대의 하식애에 새겨놓은 바위 그림이다. 이 바위 그림은 특이한 점이 있는데, 세계 최초의 고래 그림이 새겨졌다는 점이다. 이뿐만 아니라 고래의 사냥(포경) 과정이 자세히 설명되어 있고, 다양한 고래 종의 생태적 특징을 잘 살려서 그림을 그렸다는 점이 인상적이다. 이러한 암각화는 누가, 언제, 왜 그렸는지 지적 호기심을 불러일으키며, 상당히 오래된 이 암각화의 보존적 특징은 탐구의 대상이 된다.

가장 먼저 암각화 위에 돌출된 형태는 비가 올 때 암각화가 젖지 않도록 하는 특징을 가진다. 물은 풍화작용을 촉진시키므로 암각화에게 치명적이다. 주목할 특징은 암석이다. 이 암각화가 새겨진 암석에 관심을 가져 보고자 한다. 대곡천 인근의 화강암 관입이 일어난 망성리 욱곡마을이 있다. 이곳은 화강암이 시간이 흘러 풍화, 침식된 분지 형태이다. 그림 13의 지질도를 살펴보면 화강암 관입 주변에 변성작용이 일어났음을 알 수 있다. 반구대 암각화을 이루는 암석은 대구층이라는 퇴적암이다. 퇴적암은 일반적으로 쉽게 풍화, 침식되는 경향이 있는데, 오랜 시간이 흘러도 보존된다는 점은 지질도로 파악할 수 있는 것이다. 화강암의 관입과 접촉 변성 작용으로 퇴적암인 대구층은 혼펠스화, 고화가 일어나 비교적 무르지 않고 단단한 암석의 특성을 가진다. 이는 대곡천 일대의 대구층까지 영향을 주어 보존이 될 수 있었던 것이다.

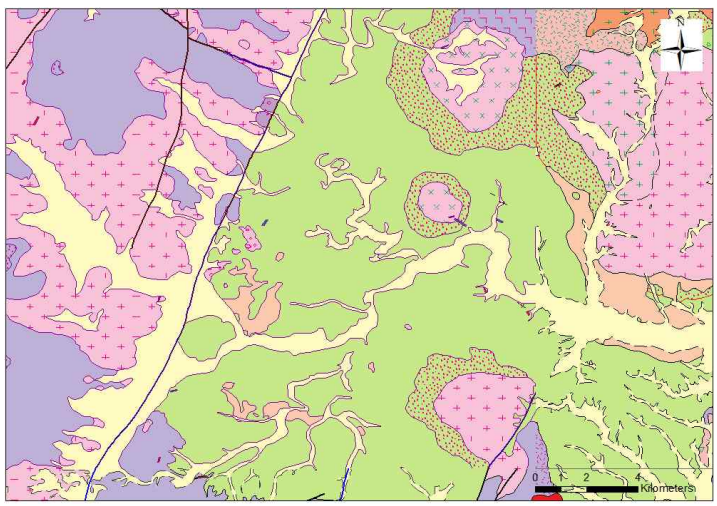


그림 13 언양 일대의 지질도(한국지질자원연구원, ArcGIS 편집)

암각화의 제작 시기 역시 자연과학적 탐구 대상이다. 고고학자들은 청동기 시대, 철기 시대에 제작되었다고 주장하였다. 그 이유는 바위에 그림을 세길 수 있는 단단한 물체가 있어야 했기 때문이다. 반구대 암각화의 제작 시기에 관한 여러 의견이 있었지만, 황상일·윤순옥(1995; 2000)은 지형학적, 제4기학적 연구를 통해 7,000년 BP(울산암각화박물관, 2013) ~ 6,000년 BP 신석기 초기에 암각화를 새기기 시작하여 3,000년 BP 경에 중단되었다고 결론을 내렸다. 신석기 시대는 기온이 온화한 홀로세 초기부터 중기까지 간석기와 빗살무늬토기를 사용한 시기이다. 초기에는 채집, 수렵, 어로 중심의 생활상이었으나 농경이 시작되고 가축을 기르는 혁명을 이루게 되었다. 이 시기는 최종 빙기 이후 온난하여 해수면이 급상승하고 다양한 환경변화가 일어났다.

특히 반구대 암각화는 신석기인들의 포경(捕鯨)문화와 환경 적응을 보여준다. 고래 등의 해양동물과 육상동물의 형태와 고래잡이 방식을 암각화로 표현하였다. 신석기 초기 해진 극상기는 현재 태화강 굴화리 일대까지 내만 환경을 만들었다. 선사인들은 자신의 거주지에서 멀지 않은 환경에서 고래잡이를 하였을 것이다. 그곳에서 대곡천의 신석기인들은 결합식 작살과 몰이법으로 고래를 잡았다. 울산 황성동에서 출토된 고래 뼈는 이러한 포경의 흔적이다. 또한, 세죽 유적의 도토리 구덩이는 해수면 상승의 증거이다. 도토리는 신석기인의 주식으로, 떫은맛을 내는 탄닌(tannin)을 제거하기 위해 해수면 고도 근처의 바닷물에 담갔을 것이다. 도토리 구덩이의 이동 형태를 보아 해면 상승에 따라 해안선이 내륙 쪽으로 이동해 고래잡이가 유리한 환경이 형성되었을 것이다. 이후 해면이 안정되고 태화강이 운반하는 퇴적물로 메워 충적평야가 발달하면서 내만이 좁아져 해안선이 바다 쪽으로 이동하면서 고래보다 사슴, 호랑이 등을 사냥하게 되었다. 이처럼 해수면 변동은 선사인의 생활상을 바꾸는 중요한 요인이었다(그림 14). 이처럼 암각화는 고고학, 해양학, 생태학 등의 분야에서 뛰어난 가치를 지니고 있다.

하지만 1965년 생활용수를 위해 사연댐이 건설되어 대곡천 수위가 올라가 반구대 암각화는 침수 피해를 입었다. 암석의 절리에서 물이 침수해 풍화작용을 일으켜 빠르게 손상되었다. 수평적 침수는 암각화 하부의 함수율을 높였고, 수평적 절리는 물이 침투하여 함수율이 높아진다. 이는 결국 화학적 풍화작용을 가속하는 원인이 된다. 따라서 암각화의 보존과 가치를 위해 지방자치단체와 학자들은 반구대 암각화와 천전리 각석의 유네스코 세계문화유산 등재를 위한 노력을 기울이고 있다(이석훈·김수진, 2004; Hwang *et al.*, 2010).

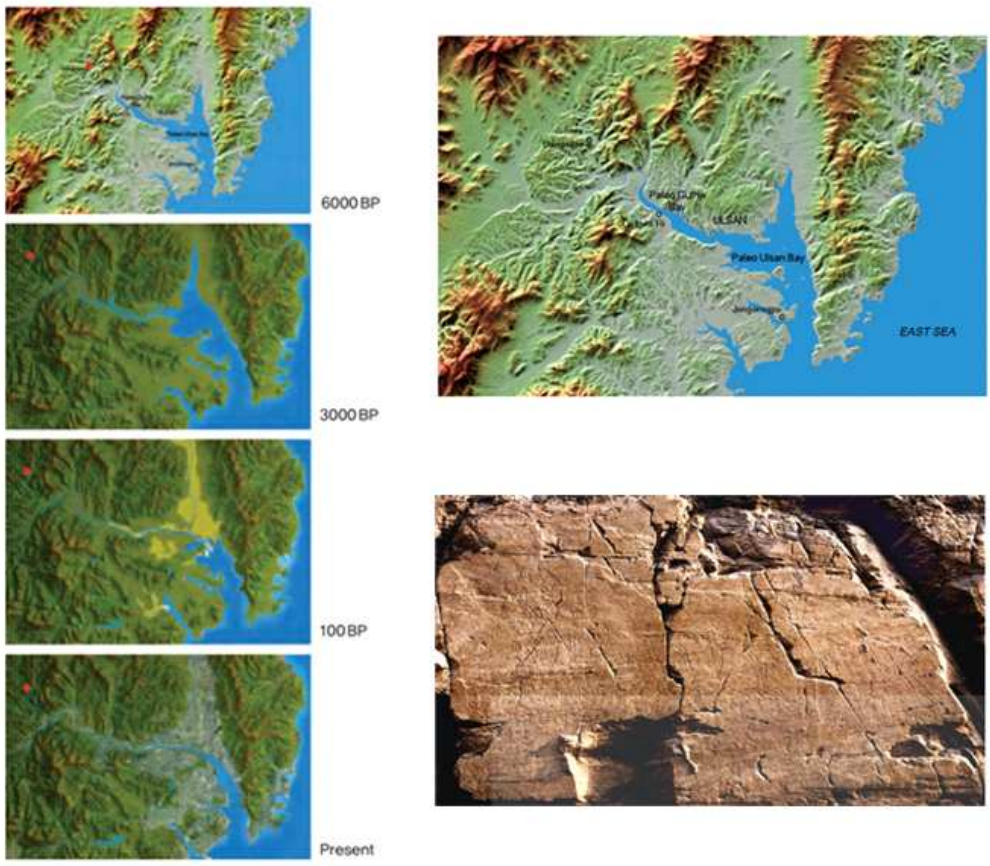


그림 14 고울산만의 경관과 반구대 암각화(황상일·윤순옥, 2000; 황상일·윤순옥·울산암각화박물관, 2013)

(3) 오픈플랫폼과 제4기학

제4기 환경변화는 지질학, 지형학, 해양학, 식물지리학, 기후학 등의 연구 분야에서 중요하게 다루어지는 주제다. 이러한 고환경 복원을 위해서는 다양한 지표 자료를 활용해야 하는데 지질도 역시 참고자료로 활용될 수 있다. 지역의 개관과 암석의 분포 등을 통해 이 지역의 특징을 알 수 있고, 제4기층의 분포를 통해 과거에 이 지역은 다른 경관이었음을 예측해볼 수 있다. 특히 낙동강 중·하류부의 범람원은 그림 15에서 볼 수 있듯이 제4기층으로, 지난 LGM 때 개석된 하도이며, 해진극상기 때 해진현상으로 바닷물이 내륙까지 들어올 수 있었다. 태화강, 섬진강도 마찬가지로 침식곡-익곡-매적곡의 형태를 거쳐 오늘날의 모습을 가지게 되었다. 한반도의 제4기 연구는 여전히 중요한 과제이며, 고수로 연구는 아직 섬진강의 사례가 유일하다. 이러한 이유로 좀 더 연구가 진행되었으면 하는 바람이다.

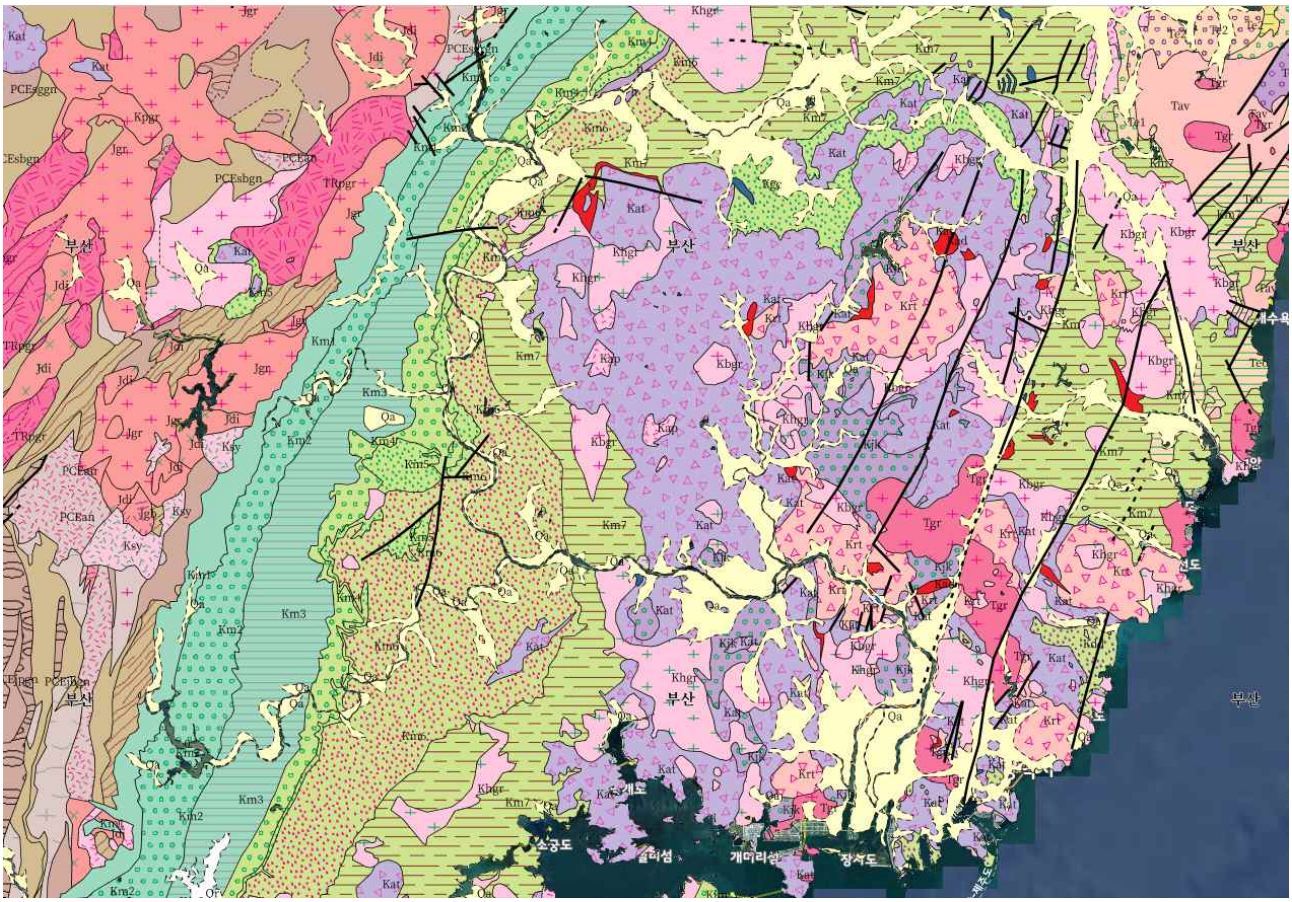


그림 15 부산 지질도 1:250,000(지질주제도 통합검색 서비스)

2. 한반도 남동부 활단층 및 지진 연구를 위한 지오빅데이터 오픈플랫폼 자료 활용

(1) 한반도의 단층

우리나라는 서해안과 동해안, 남부 지방에 주로 단층이 분포되어 있다(그림 16과 17). 특히 양산단층과 울산단층은 대표적인 제4기 활단층이다. 양산단층은 북북동-남남서 주향의 우횡변위 주향이동단층이다. 김해만과 영일만을 걸쳐 같은 방향의 다른 단층선들과 단층계를 이룬다. 단층운

동의 결과 단층선곡 방향으로 형산강, 양산천 등의 적종 하천이 형성되었다. 단층선을 따라 선상지와 애추가 존재하며 이들이 좌우로 분포하는 모습은 주향이동단층의 근거가 된다. 이러한 힘의 원동력은 유라시아판이 태평양판으로 섭입해 발생한 횡압력의 영향으로 지괴가 미끄러지면서 우횡변위한 것이다. 지질도의 부자연스러운 암석 배치는 이러한 이동 때문이다(우병영, 1984). 울산단층은 북북서-남남동 주향의 단층으로 울산과 경주를 걸쳐 경주에서 양산단층에 수렴한다. 이 단층선곡은 불국사 인근에서 울산까지 복합 선상지가 형성되어 있다. 단층선 북부에 북서-남동 주향과 북-남 주향의 단층선이 거의 직각으로 교차한다. 이는 각각 북동쪽에서 오는 횡압력과 동해에서 서쪽으로 작용하는 압축력(횡압력)으로 형성되었다.

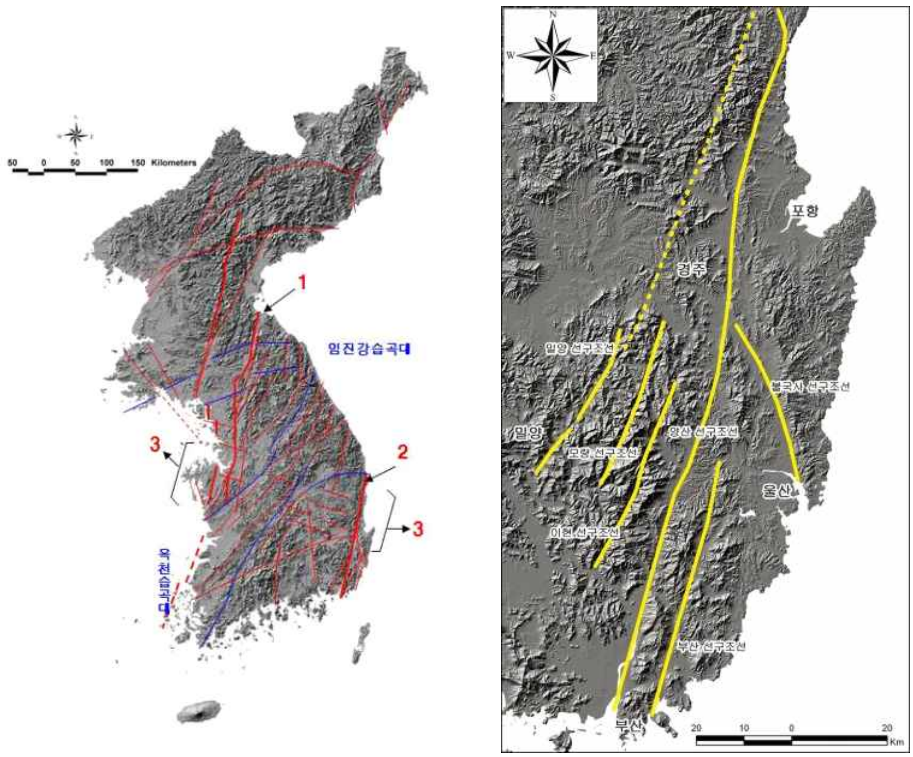


그림 16 한반도 지체구조분할구와 활단층 지도(한국지질자원연구원, 2012)(왼쪽)
그림 17 경상 분지의 단층 지도(한국지질자원연구원, 2009)(오른쪽)

(2) 불국사의 내진 설계

2016년 규모 5.8의 경주 지진과 2017년 규모 5.4의 포항 지진이 발생하면서 활단층은 살아있다는 것을 실감하고 활단층 연구의 필요성을 재확인하게 되었다. 양산단층을 중심으로 주변의 단층들이 단층계를 이루어 단층운동의 활성기가 일어나면 영남 지방뿐만 아니라 전국적으로 피해가 예상된다(김영석 등, 2017; 경재복·이기화·오까다 아쯔마사, 1999).

하지만 불국사는 지진 피해가 적어 이미 천 년 전부터 내진 구조가 갖춰져 있다는 것으로 재조명되었다. 한반도 동남부에 위치한 경주는 사로국이 건국되어 통일신라가 멸망하기까지 천년의 고도(古都)이다. 그러나 경주는 한반도의 가장 긴 단층선, 양산단층이 통과하고, 양산단층과 울산단층이 교차하는 지질, 지형적으로 독특한 곳이다. 하지만 이러한 단층선이 교차하면 단층운동으로 지진이 빈번하게 발생한다. 실제로 삼국사기, 고려사, 조선왕조실록 등을 참조하면 경주에서

지진이 빈번하였음을 알 수 있다. 삼국사기에는 혜공왕 15년(779년), 경주의 지진으로 가옥이 붕괴하고 사망자 100여 명에 달했다고 한다. 고려사는 정종 2년(1306년), 경주는 3일 동안 지진이 계속되었다고 한다. 조선 시대에는 지진 관련 기록이 2천 번이 넘는다. 이처럼 과거에 우리나라는 지진이 계속해서 언급되었던 것을 통해 활성기와 잠복기가 있다는 것을 알 수 있다.

울산단층은 역단층으로 상반이 융기하여 불국사 산맥을 형성하였다. 이러한 지형적 특성뿐만 아니라 단층운동은 응력을 해소하는 과정에 지진을 일으키기 때문에 인간 생활과 관련해 지진은 중요한 문제이다. 불국사 산맥은 지난 빙기에 선상지를 형성하였다. 불국사 합류 선상지 일대는 고위면은 능선의 형태로 좁고 길쭉한 형태이며, 중위면은 비교적 넓다(윤순옥·황상일, 1999). 따라서 과거 통일신라인들은 이러한 지형적 특성을 고려해 중요 가람을 중위면에 배치하였을 것이다. 불국사 인근의 노두를 통해 불국사로 단층선이 통과하고 있음을 추정한다(그림 18).

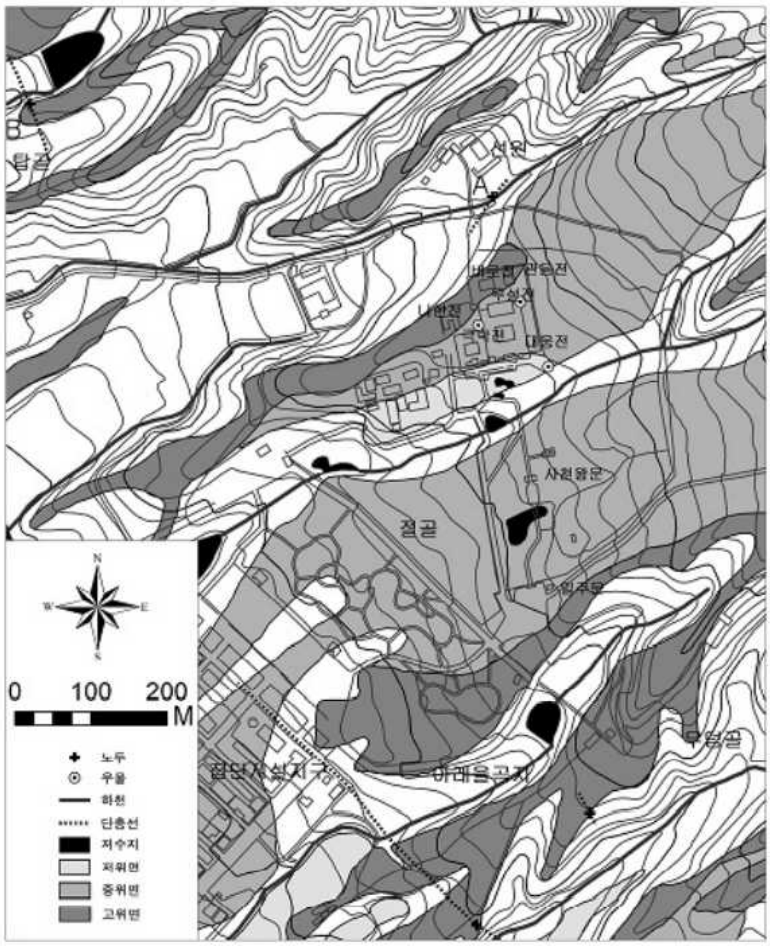


그림 18 불국사 지역 지형 개관(황상일, 2007)

불국사는 내진 구조의 꽃, 정점이라고 볼 수 있다. 불국사는 지형적 한계점을 극복하기 위해 석축을 세움으로써 고도 차이와 지진위험으로부터 벗어나고자 하였다. 석축에는 내진의 강도에 따라 세 가지 유형으로 나뉜다고 한다. 대웅전 남회랑, 극락전 남회랑, 대웅전 서회랑이 대표적이다. 대웅전 남회랑은 청운교, 백운교가 있는 대웅전 앞의 석축으로 섬세한 아름다움과 안정적인

구조를 지닌다. 다리 하나하나를 결구 양식을 이용해 조립하고, 그렝이 기법을 통해 석축의 기단을 세웠다(그림 19). 석축 안에는 돌을 채워넣었고 이의 흔들림을 방지하기 위해 주두석으로 고정해놓았다. 중방석과 주두석을 이중으로 사용하여 더욱 안정된 구조를 꾀하였다. 이러한 이유는 선상지 중위면의 확장에 따른 불안정한 지반과 대웅전은 중요 가람이므로 이를 지진으로부터 보호하기 위함이다.

이처럼 신라인들의 과학적 지혜와 예술성은 21세기 4차 산업혁명이 진행되는 중에도 놀라움을 선사한다. 한반도는 결코 지진 안전 지대가 아니다. 과거의 기록으로부터, 또 최근의 지진 동향으로 보았을 때 우리는 지진 위험에 대한 인식을 가지고 살아야 할 필요가 있다. 또 국가적 재난 수준의 지진이 왔을 때 성숙한 대처를 해야 한다.

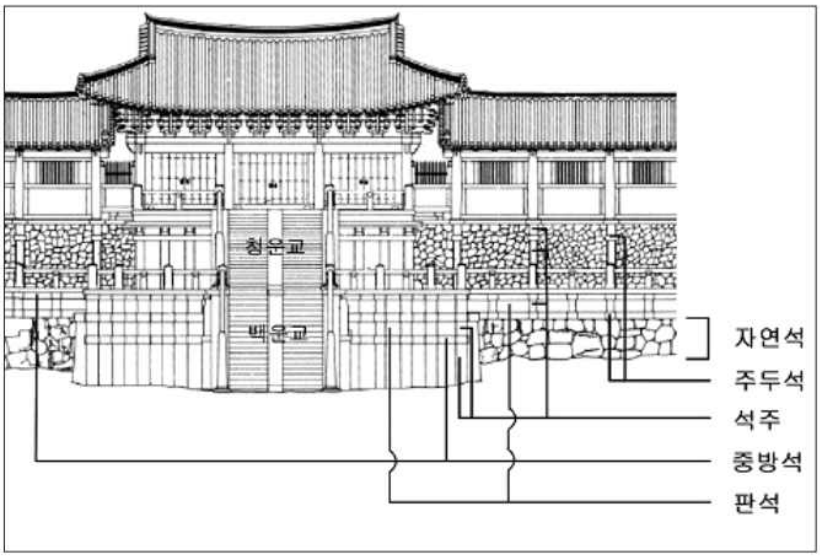


그림 19 불국사 대웅전 남회랑

(3) 오픈플랫폼

지오빅데이터 오픈플랫폼에서는 지진연구정보 서비스, 단층지도와 역사지진, 계기지진의 분포도를 제공하고 있다. 이러한 지진 관련 자료들을 바탕으로 지진위험 지도와 통계 분석을 해볼 수 있을 것이다. 한국지질자원연구원에서 지속적인 단층과 지진 연구를 하여 자료를 개방한다면, 우리나라의 지진 안전 문제와 문화재 보존을 좀 더 예측 가능하고 대비 가능할 것이다.

3. 지질·지형 답사를 위한 지오빅데이터 오픈플랫폼 자료 활용

(1) 지질·지형 답사

지질 답사는 어떤 지역에 존재하는 암석의 종류 및 분포, 생성 순서, 지질 구조 등을 조사하는 과정이다. 암석이나 지층이 직접 지표로 노출된 노두를 통해 조사할 수 있다. 조사 지역의 암석과 지층이 어떤 변화를 거쳐 현재의 지질 구조를 이루는지 알아내는 목적이다. 지형 답사는 어떤 지역에 존재하는 지형의 종류 및 분포, 형성 과정 등을 조사하는 과정이다. 조사 지형의 기반암에 따라 어떤 지형이 만들어졌는지 알아내는 목적으로 지질 답사와 함께 상호 보완 관계이다.

지질·지형 답사를 위해서는 이론적인 배경을 습득하는 것이 우선이다. 우선 답사 지역의 개관과 더불어 어떤 지질적, 지형적 특성을 갖는지 전공서, 논문, 지오빅데이터 오픈플랫폼 등을 통해 조사한다. 답사를 위해 필요한 준비물은 스케치 및 내용을 기록할 수 있는 메모장, 지형도, 지질도, 클리노미터, 망치, 확대경, 필기도구, 자 등을 준비한다. 지형도는 답사 지역의 고도나 주변 환경을 확인할 수 있으며, 답사할 지역의 거리와 시간 계획을 짤 수 있다. 지질도는 본래 지질 답사를 바탕으로 작성한 지도이지만, 답사 과정에서 이 일대는 어떤 암석이 주를 이루는지 확인할 수 있기에 활용한다. 특히 지질도는 한국지질자원연구원의 지오빅데이터 오픈플랫폼을 통해 제공받을 수 있다.

(2) 부산

1) 지역 개관

부산광역시는 울산광역시, 김해시, 창원시, 양산시와 인접해 있으며, 중생대 백악기에서부터 홀로세에 이르기까지 다양한 암석과 지형이 나타난다. 또 양산단층과 동래단층, 일광단층 등이 통과하고, 남해안, 동해안과 인접해 있는 특징이 있다. 경상분지의 남동부로서, 유천층군과 다대포층, 태종대층 등이 존재한다(강가령 등, 2014). 중생대 백악기 퇴적층에 불국사 화강암이 관입하였으며, 제3기의 유문암질, 안산암질 암맥, 제4기 충적층이 분포하고 있다. 부산지질공원은 지난 2013년에 국가지질공원으로 인증되었고, 낙동강하구, 몰운대, 두송반도, 송도반도, 두도, 태종대, 오륙대, 이기대, 장산, 금정산, 구상반려암, 백양산이 12곳의 지질명소이다(부산국가지질공원).

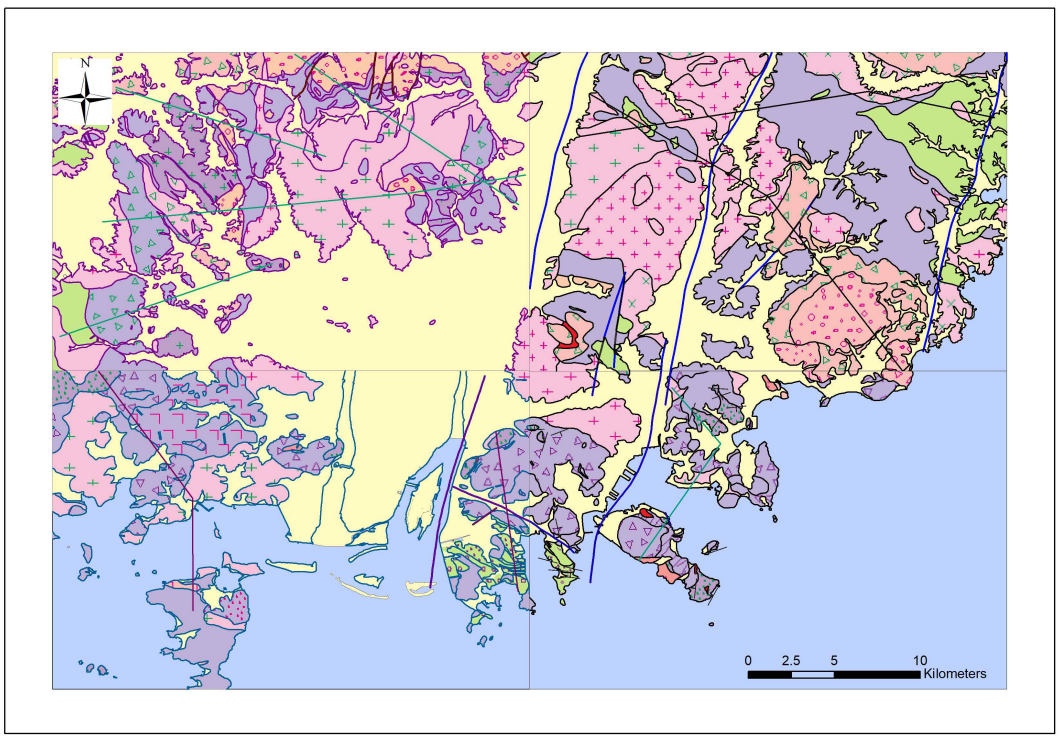


그림 21. 부산 전역의 지질도(지오빅데이터 오픈플랫폼, ArcGIS 편집)

2) 답사 진행

낙동강과 남해가 만나는 하구부에는 강과 바다가 만들어낸 삼각주가 나타난다. 하천 운반 퇴적물이 만들어낸 하중도와 파랑이 밀어올린 사주, 모래톱 등이 자리잡고 있다(김성환, 2005). 낙동강 하구부는 제4기 활단층인 양산단층의 우횡변위 결과 생겨난 지형으로, 이러한 지형 조건에서 지난 빙기에 강한 침식을 받아 침식을 받은 내만의 형태가 생겨난 후 해수면 변동과 하천의 침식, 운반, 퇴적 작용으로 오늘날의 삼각주 형태와 충적평야가 형성되었다. 이곳은 해안습지, 철새 도래지로 지질적 가치뿐만 아니라 생태적 가치가 높은 지질명소이다.



그림 22. 낙동강 삼각주

태종대는 영도의 끝에 위치한 곳으로, 신라의 태종무열왕이 해안절경에 감탄을 했고, 이곳에서 활쏘기 연습을 해 태종대라는 이름이 붙었다. 다양한 지질구조와 노두를 확인할 수 있는 곳으로 해안지형(파식대, 해안단구, 해식애, 해식동굴, 역빈, 마린포트)과 퇴적암, 안산암, 암맥, 구상혼펠스, 주향이동단층 흔적 등을 살펴볼 수 있다. 지질명소로서 다양한 지질을 볼 수 있으며, 바다의 풍경, 풍부한 생태계를 보여주고 있어 천혜의 자연을 느낄 수 있다.



그림 23. 부산국가지질공원 간판



그림 24. 신선바위(파식대지와 해안단구)

(3) 울산

1) 지역 개관

울산광역시는 양산단층과 울산단층이 통과하는 지역으로 독특한 지질, 지형 구조를 갖는다. 중생대 퇴적층인 대구층, 중생대의 불국사 화강암 및 언양 화강암과 더불어 영남알프스의 안산암, 제4기 충적층 등이 울산 일대를 이루고 있다. 특히 불국사 화강암의 관입으로 퇴적암(대구층) 일부는 혼펠스화되었으며, 화강암 관입 지대는 오랜 시간 침식과 풍화로 침식분지가 형성되었다. 이러한 지질적, 지형적 특성은 과거 신생대 제4기 초·중기 경 반구대 암각화의 형성 배경이 된다. 반구대 암각화의 암석은 관입의 영향으로 일부 경화가 되어 일반적인 퇴적암보다 상대적으로 단단하다. 또 반구대 암각화가 자리 잡은 대곡천 일대는 태화강의 지류 하천으로서 곡류 절단, 하식애, 하안단구 등의 하천 지형이 나타난다. 조사한 자료를 바탕으로 울산광역시 울주군 중심의 답사를 설계하였다.

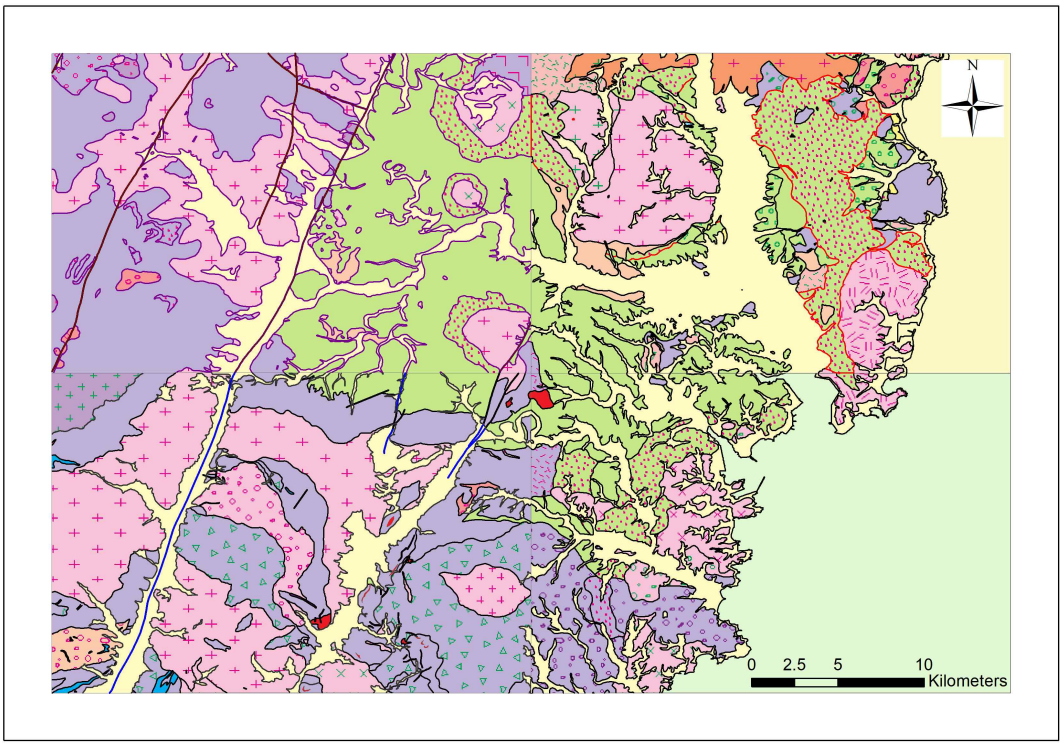


그림 25 울산 전역의 지질도(지오빅데이터 오픈플랫폼, ArcGIS 편집)

2) 답사 진행

대곡천은 태화강의 지류천으로 대곡댐을 지나 반구대 일대에서 곡류 절단 후 사연댐으로 흘러 다시 태화강에 합류한다. 이곳의 지층은 경상계 신라층군 대구층과 제4기 충적층으로 이루어져 있다. 이 일대는 국보 147호 천전리 각석과 국보 285호 반구대 암각화가 존재하며, 각각 청동기 시대와 신석기 시대를 대표하는 암각화이다. 또 근처에 중생대 백악기 대구층에서 공룡 발자국 화석이 나와 이곳이 공룡 서식지였음을 알 수 있다. 또한, 하식애와 하안단구, 곡류 절단에 따른

습지, 구하도 등을 관찰할 수 있다. 이처럼 대곡천 일대는 지질학적, 지형학적 가치가 높은 지역으로 지속적인 연구가 필요하다. 또한, 대곡천 일대의 암각화들을 유네스코 세계문화유산으로 등재하기 위한 노력이 진행되며, 이 일대의 자연환경은 매우 중요하게 여겨진다.

망성리 욱곡마을 일대는 불국사 화강암이 관입하여 만든 차별침식분지 지형을 이루었다. 내부는 낮은 평지(분지)이며, 산이 둘러싸고 있다. 중생대 시기 화성활동은 화강암 관입을 일으켰고, 그 결과 퇴적암층의 일부분이 접촉변성작용을 받아 변성암(혼펠스, 편마암)이 되었다. 시간이 흘러 융기와 침식, 풍화로 화강암층이 분지 상태가 되었다. 이 일대는 주로 감 농사(과수원)를 지었으며, 노두에서는 화강섬록암, 화강암, 퇴적암, 혼펠스, 편마암 등을 관찰할 수 있다. 또 횡압력을 받아 습곡구조 형태를 띤 모습도 관찰할 수 있었다. 이러한 화강암 관입에 따른 차별침식분지는 망성리 욱곡마을뿐만 아니라 두동면, 청량읍 일대에서도 나타난다.

태화강은 가지산에서 발원하여 여러 작은 하천들이 합류한 후 울산만으로 흘러나가는 47km의 하천이다. 가지산, 신불산 등의 영남알프스 일대 높은 산지를 지난 후 평야 지대와 양산단층선곡을 통과하는 상류는 비교적 직선의 유로 형태이다. 하지만 산간지역의 협곡을 지나면서 심하게 감입 곡류를 하는 모습을 보인다. 이는 양산단층이 25km 우횡 변위한 주향이동단층이기 때문에 좌우는 전혀 다른 형태의 지형이 나타나 좌측은 충적평야가, 우측은 협곡을 이룬다.

대곡천과 합류하는 지점을 포함하여 구영리, 굴화리 일대까지 감입 곡류를 심하게 하며 하천 양안에 하안단구를 만들었다. 중류부의 하상은 입암리보다 사연리에서 넓게 관찰되며 이는 대곡천이 합류하고 감입 곡류를 하면서 공격사면이 침식되기 때문으로 판단된다. 또 범서읍 입암리의 선바위는 지형학적으로 시 스택으로 분류되어 과거에 이곳까지 해수의 영향이 있었을 것이라 추측된다. 선바위 인근 태화강의 자연제방은 모래층으로 퇴적되어 있다. 선바위 남쪽 선바위교 일대 하상은 자갈층이 많이 퇴적되어 있다. 이는 인간의 개입으로 설치된 인공물에 의한 것으로 보인다.

울산만은 태화강 하구에 남구와 방어진으로 둘러싸인 내만이다. 울산단층선의 영향으로 만들어진 구조곡만이다. 울산단층선은 경주에서 양산단층선과 교차하여 단층선곡을 따라 불국사 산맥이 발달하였다. 이곳에는 적종 하천인 동천이 흐르며, 단층선의 영향으로 만의 형태가 만들어졌다. 울산만은 다른 만과 달리 내만의 형태가 잘 나타나며, 이는 동해안의 하천의 규모가 일반적으로 작아 퇴적물 운반량이 많지 않기 때문이다. 홀로세 최적기 때는 이보다 더 큰 규모로, 태화강의 하구 안쪽까지 내만을 이루었을 것이다. 울산만은 귀신고래의 회유 해면으로 지정되어 있으며 이는 과거에도 고래가 울산만에 자주 접근하였을 것이라는 추측을 해볼 수 있다. 평지에서는 울산만의 모습을 관찰하기 어려우므로 울산대교전망대에서 울산만의 모습과 울산의 전경을 관찰할 수 있었다. 장생포는 울산만의 어귀에 위치하며, 조선 말부터 1980년대까지 포경업이 번영하였다.



그림 26 반구대 암각화



그림 27 천전리 각석



그림 28 대곡천 합류 지점



그림 29 범서읍 입암리 선바위



그림 30 웍곡마을의 섬록화강암



그림 31 웍곡마을의 변성암

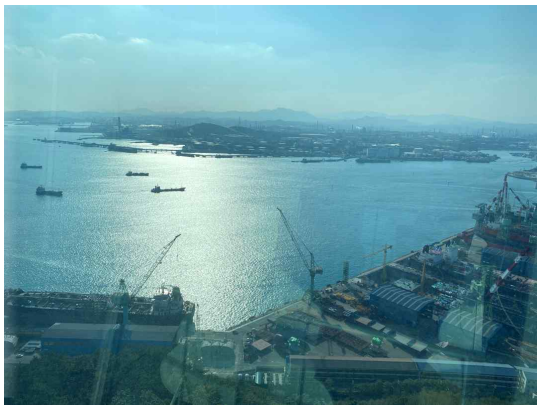


그림 32 울산대교전망대에서 본 울산만

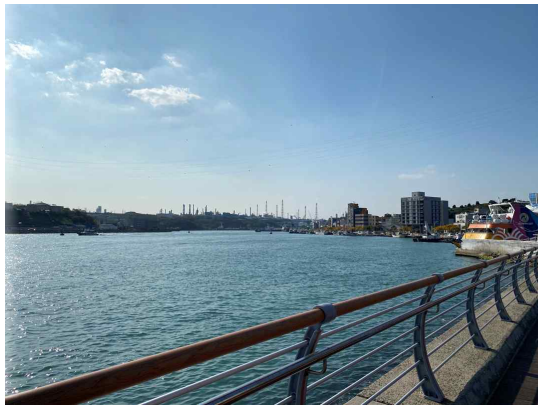


그림 33 장생포

(4) 경주

1) 지역 개관

경상북도 경주시는 영천시, 포항시, 울산광역시와 인접해 있으며 선상지 지형이 발달했다. 경주는 양산단층과 울산단층이 교차하며, 이들은 각각 주향이동단층과 역단층이다. 양산단층의 영향으로 경주의 가장 큰 범람 하천인 형산강은 단층곡을 따라 북류하고, 지류천인 북천과 남천은 토함산 일대에서 발원하여 경주 분지를 지나 합류한다. 경주 선상지(경주 분지)는 북천이 운반한 퇴적물을 쌓아 만들어진 자갈층의 단일 선상지이다. 이곳은 저지대로 농지로 많이 이용된다. 불국사 산맥은 단층운동의 영향으로 상반이 융기한 역단층이다. 토함산 전면의 불국사 선상지들은 작은 하천들이 운반한 퇴적물들이 골짜기에서 쌓인 합류 선상지이다. 불국사 선상지 중위면은 주로 농지로 이용된다. 중생대 경상분지와 신생대 포항분지에 해당하여 중생대와 제3기 퇴적암이 분포해 있으며, 중생대에 관입한 불국사 화강암은 경주 남부지역의 주요 암석이다. 제3기 퇴적암은 천북면 일대에서 관찰된다. 관입에 따라 변성암의 종류인 혼펠스가 확인되기도 한다. 감포 및 나정리 일대는 간빙기에 평편한 해안단구가 발달하여 동해안의 해안단구 특성이 나타난다.

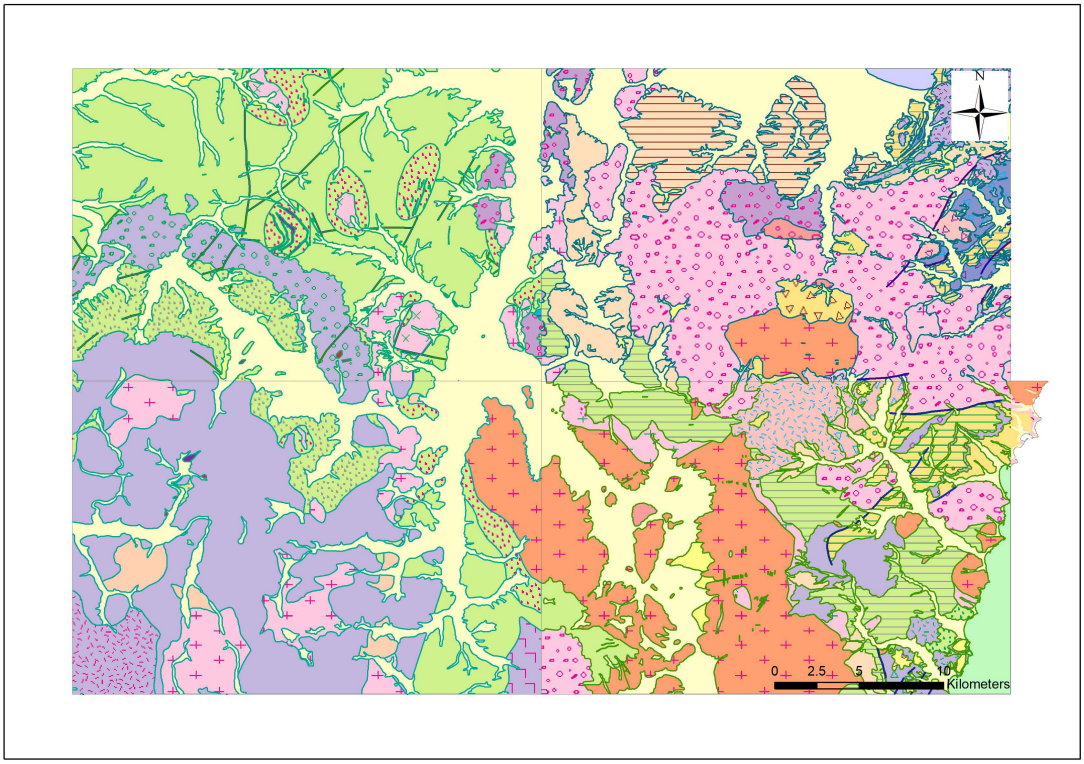


그림 34 경주 전역의 지질도(한국지질자원연구원, ArcGIS 편집)

2) 답사 진행

신라의 수도였던 경주 왕경 지역은 경주 분지이자 경주 선상지이다. 이곳은 제4기 퇴적층이며, 역층이 발달하였다. 경주 선상지는 토함산 전면을 흐르는 하천인 북천에 의해 형성되었다. 빙기에 북천은 토함산을 침식하여 운반한 퇴적물을 덕동호와 보문호를 지나 일부 퇴적하고, 좁은 협곡을 통과해 평지에 도달하면 더 이상 운반하지 않고 곡구부에 퇴적물을 쌓게 된다. 이 퇴적물을 부채꼴 모양처럼 생겨 선상지인 것이다. 이처럼 경주 선상지는 단일 선상지로, 우리나라 최대 크기의 단일 선상지이다.

이 주변의 자연환경은 하천의 영향을 많이 받는다. 선상지 하천으로 하폭이 넓고 평상시에는 건천인 북천이 있다. 또 토함산 전면에서 발원하여 단층곡을 따라 왕경 지역 남쪽으로 흐르는 남천이 있다. 또 양산단층선의 영향으로 영일만까지 북류하는 적종하천인 형산강이 있다. 형산강은 범람을 하는 하천으로, 그 크기가 북천과 남천에 비해 크다. 따라서 형산강은 북천과 남천의 수위를 통제하고, 왕경 지역의 지하수위는 다른 곳에 비해 높다. 이러한 흔적은 왕경 지역 대릉원에서 연못이 관찰되는 것과 동궁과 월지(안압지)의 용천, 황룡사지 인근 등에서 확인할 수 있다. 또 경주 지역은 신라 시대의 해자, 통일신라 시대의 해자, 조선 시대의 해자가 구분되어 있는데 이는 역시 물 공급이 용이했기 때문에 가능했다고 판단된다.

울산단층은 경주에서 시작하여 울산까지 이어진 우리나라의 활단층이다. 이곳은 각섬석 화강암, 흑운모 화강암이 발달하였다. 울산단층은 일반적으로 북북서-남남동 주향의 형태를 띠지만, 불국사 일대를 전후로 북동-남서 주향과 북-남 주향이 교차한다. 이러한 울산단층은 유라시아판

의 섭입으로 인한 동해의 압축력(횡압력)으로 생겨 역단층 운동을 한다. 따라서 토함산은 역단층 운동의 결과 상반이 융기하여 높은 산지를 이루게 되었다. 또한, 선상지면이 일정 속도로 변위한다. 답사를 통해 하동, 마동, 진티마을의 선상지면과 노두를 확인하려 하였다. 하동저수지의 노두를 통해 상반이 융기하고 하반이 침강하려는 성격을 확인하면서 역단층임을 판단할 수 있었다. 마동의 논들은 선상지 중위면임을 인지할 수 있었다.

불국사 일대는 북서-남동 주향과 북-남 주향의 단층이 선적 구조로 나타나며, 이는 산지를 자르고 단층운동을 한다. 토함산은 역단층 운동으로 상반이 융기하면서 생기 높은 산지로 이러한 동해의 압축력으로 불국사 산맥이 형성하였다. 불국사 산맥 중 가장 높은 토함산에는 합류 선상지가 연속적으로 나타난다. 이러한 선상지 지형면은 고위면-중위면-저위면에 따라 고도 차이가 발생한다. 이러한 선상지는 빙기에 만들어지며 고위면은 MIS 8, 중위면은 MIS 6, 저위면은 MIS 4 시기에 형성되었다. 고위면은 대부분 능선의 형태로 나타나며, 중위면이 비교적 넓다. 신라인들은 이러한 특성을 살려 통일신라 시대 김대성의 주관 아래 불국사 건축 20년과 그의 사후 10년을 하여 총 30년 정도를 건설하였다. 경주는 고대부터 지진이 빈번한 지역이었고, 단층운동이 활발했다. 이러한 지형적 한계를 극복하기 위해 내진 구조를 적용하면서 아름다움을 살렸다.

감포 해안단구의 단구면을 확인하고자 하며, 해안단구 중위면부터 출발하여, 상고위면까지 산행을 했으며, 감포읍의 해안단구는 상고위, 고고위, 고위, 중위, 저위면으로 분류할 수 있다. 고고위면의 노두를 확인한 후 저위면까지 이동하였다. 중위면에서 고대안까지 올라가고, 다시 황상일·윤순옥(2020)이 제시한 고고위면의 노두를 찾았다. 이곳은 논문의 모습에서 대나무가 사면 이동한 모습을 확인하였다. 또 토양이 쉽게 부서지고 무른 연약한 지반임을 확인할 수 있었다. 이곳은 신생대 제3기 감포 역암이 기반암으로 인위적으로 지표면을 깎은 것이다. 상부 해안단구 역층과 불연속적이다. 기반암은 밝은 회색 실트가 매트릭스이며, 쉽게 부서지는 특징이 있다. 표층의 유기질 흑갈색 실트층 아래로 산화된 역층이 나타난다. 연대산 일대는 골프장이 조성되어 있어 접근이 어렵다. 또 상고위면인 고대안은 상대적으로 더 평탄한 모습을 보여주었다.



그림 35 황룡사지



그림 36 복원된 월정교와 남천

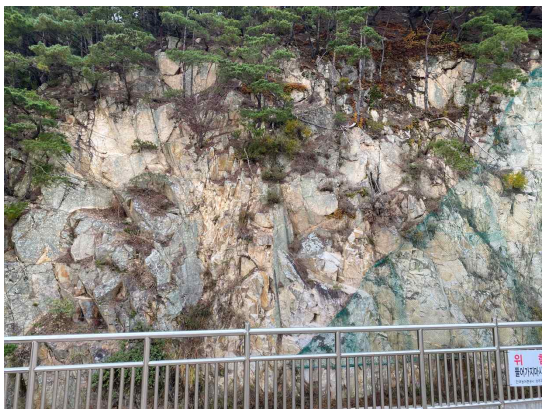


그림 37 하동저수지 노두



그림 38 마동의 불국사 선상지 중위면



그림 39 대웅전 남회랑 전면



그림 40 해안단구 고고위면 노두

(5) 오픈플랫폼

답사의 기초가 되는 이론적 지식을 습득하기 위해 오픈플랫폼을 활용하였다. 하지만 일반일들을 대상으로 보기에는 여전히 어려운 점이 있는 것 같다. 한국의 지질노두 spot을 좀 더 업데이트하여 관찰할 수 있도록 하는 것이 좋을 것 같다. 또 정기적으로 답사 관련 게시글을 올려 지질답사를 할 수 있는 가이드 라인을 제작해주어도 좋을 것 같다는 생각이다. 또 지질자원주제도 통합검색 서비스에서 검색한 사진을 저장하는 기능을 추가하거나 범례와 축척을 좀 더 보기 편하게 개선했으면 한다. 단층에 대한 정보가 정확하지 않아서 좀 더 업데이트가 필요해보인다. 특히 수치지질도에서는 단층선이 잘 나타나지 않는다. 양산단층은 나타났지만, 울산단층은 보이지 않는다. 또한, 지질자원주제도 통합검색서비스에서 바로 검색을 하면 자료를 다운로드 받을 수 있도록 개선을 한다면 보다 활성화될 수 있으리라 생각한다. 지오빅데이터 오픈플랫폼에서 국가지질공원과 협력하여 양질의 자료들을 만들었으면 하는 생각도 들었다. 수치지질도에서 부산 전지역을 합쳤을 때 '김해' 지질도에서 양산단층의 모습이 일부 나타나지 않았다. 이러한 부분을 수정한다면, 자료를 연속성 있게 사용할 때 더욱 용이할 것이라 판단된다.

Ⅱ. 오픈플랫폼 개선 사항 및 오류

1. 사이트 및 데이터 오류

1) 단층에 대한 정보 개선이 필요하다. 수치지질도에 양산단층은 나타나지만, 울산단층이 나오지 않았다.

2) 낙동강 삼각주의 연안사주 형태가 실제와 불일치한다.

3) 지질자원주제도 통합검색에서 한국의 지질노두 위치 정보가 실제와 맞게 표시되었는지 면밀하게 검토할 필요가 있다. 지난 보고서에서 '호박소 백악기 화강암과 돌개구멍'의 위치가 잘못 표시되었다는 것을 발견하였다.



그림 41. 지질자원주제도 통합검색의 한국의 지질노두 위치 정보 오류

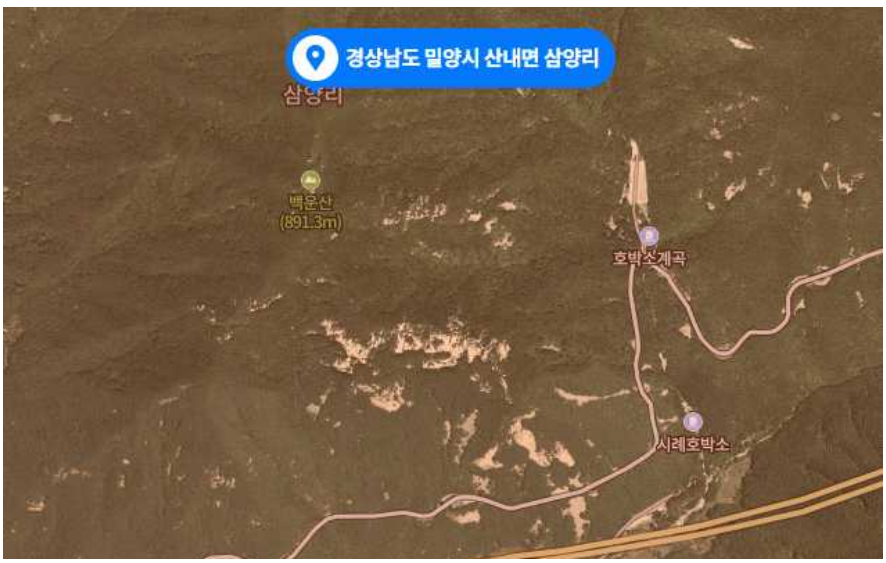


그림 42. 네이버 지도에서 본 호박소의 위치

4) 김해 지질도에서 양산단층의 모습이 나타나지 않았다.

5) 지진관측소에서 관측소 정보를 csv 파일로 다운로드 받아 ArcGIS 또는 QGIS로 관측소의 위치를 베이스맵 레이어에 띄워보려고 하였으나, 좌표계가 따로 나와 있지 않아 그 과정에서 자꾸 오류가 생기고 정확한 위치에 관측소가 나타나지 않았다. 따라서 전국 shp를 띄울 때 좌표계를 재투영할 수 있도록 어떤 좌표 체계를 가지고 있는지 설명해주었으면 좋겠다. 이뿐만 아니라 define project를 통해 해결하려고 하였으나 이 역시 사용할 수 없었다. 이 부분에 대한 개선이 필요하다고 본다.

6) 수치지질도(전국) 1:25만 shp 파일을 다운로드 받아 ArcGIS에서 열었으나 암석의 구분이 불가능하다(그림 43).

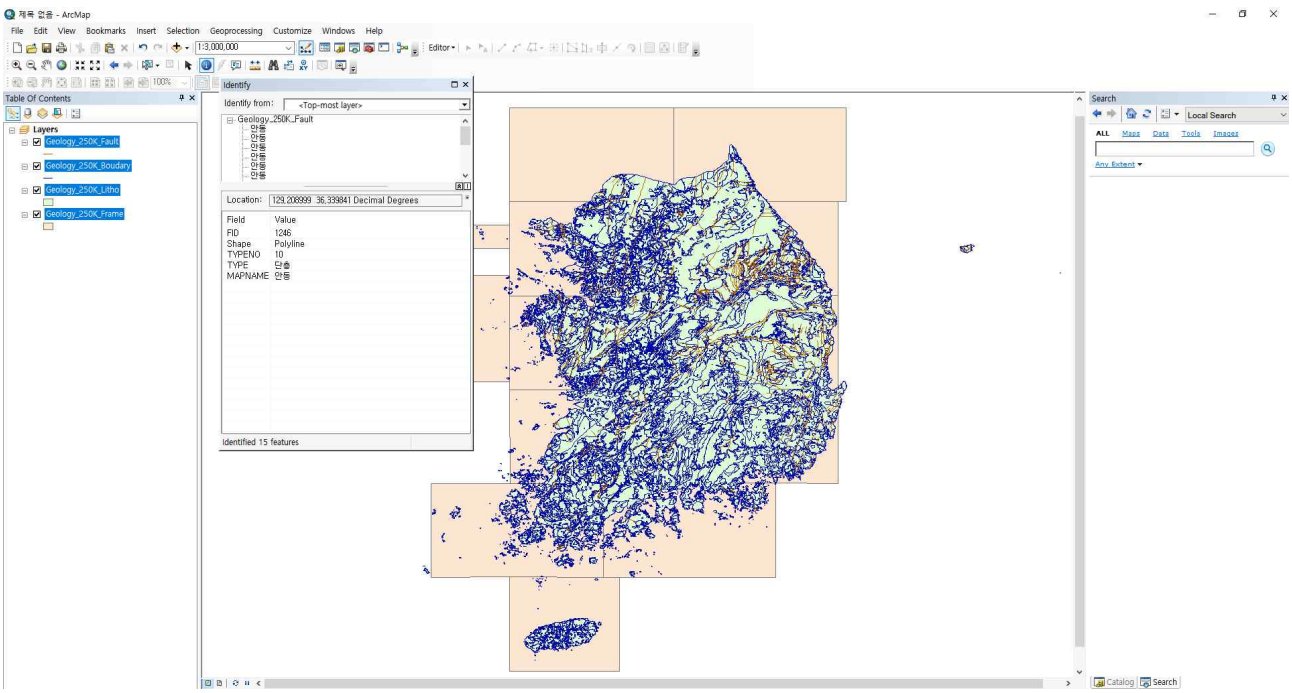


그림 43 ArcGIS에서 본 1:250,000 수치지질도

2. 개선 사항

1) 답사 때 참고했던 경험을 바탕으로, 한국의 지질노두 spot을 좀 더 업데이트하여, 지질 답사 때 활용할 수 있도록 한다.

2) 정기적인 답사 관련 게시글을 올려 지질 답사를 할 수 있는 가이드라인을 제작한다.

3) 지질자원주제도 통합검색 서비스에서 검색한 사진을 저장하는 기능을 추가한다.

4) 지질자원주제도 통합검색 서비스의 범례와 축척이 좀 더 보기 편하게 개선되었으면 한다.

5) 고등학교 지구과학 교수학습을 위한 자료 모음이나 항목(카테고리)를 만들면 좋겠다.

6) 지질자원주제도 통합검색 서비스에서 바로 검색을 하면 자료를 다운로드 받을 수 있도록 개선이 필요하다.

7) 제4기 홍적층, 충적층만 레이어에서 제거할 수 있는 기능을 만들면, 제4기 환경변화 연구에 도움이 될 것이다.

8) 한국의 지질노두의 이름과 위치에 대한 자료를 CSV 파일로 제공했으면 한다.
9) 해저지질정보 서브스에서 섬진강 고수로의 연구에 관한 정보를 이해하기 어렵다. 간략한 설명이나 관련 보고서를 바로 확인할 수 있는 기능이 있으면 한다.
10) 금강 지하수 관련 지도의 shp 파일을 개방했으면 한다.
11) 지난 2021년 지질자원 데이터 활용 및 인공지능 경진대회의 결과물 보고서나 PPT 자료를 게시하였으면 한다.
12) 데이터 활용 경진대회뿐만 아니라 대학생, 대학원생 지질 관련 논문 공모전을 진행하여 지질 관련 학부생이 보다 깊이 있는 학문에 매진할 수 있도록 독려했으면 한다.

Ⅲ. 모니터링단 활동 결론 및 제언

지난 6개월 동안 지오빅데이터 오픈플랫폼 모니터링단을 하면서 여러 지질, 지형 관련 자료를 접해보았다. 모니터링 활동을 알게 된 계기는 수치지질도 shp 파일을 다운로드하기 위해 지오빅데이터 오픈플랫폼에 방문하여 공지사항을 통해 지질 관련 빅데이터를 검토하고 제안하는 역할이었다. 지리학 전공자로서 지질 관련 활동에 기여할 수 있을지 처음에는 고민이 되었다. 하지만 평소 지질에 흥미를 가지고 있었고, 지형학과 자연재해, 제4기학 등의 관련 분야를 배우고, 지질학과 지리학은 상호작용할 수 있는 분야이기에 지질학과 지리학의 관계에 대해 좀 더 알고 싶었으며, GIS를 활용해 검토해볼 수 있다는 점에 모니터링단을 지원하게 되었다. 매월 데이터 및 사이트의 오류나 기능 개선, 데이터 활용 방안 등의 항목에 대해 보고서를 쓰는 것은 흥미로운 일이었다. 오픈플랫폼에는 다양한 자료가 있었기 때문이다. 지질도, 지구물리지도, 지진 관련 자료, 논문, 보고서 등 다양한 지질 관련 내용을 살펴볼 수 있었다.

지리학은 지표에서 일어나는 모든 현상을 연구하는 학문이지만, 지질학은 지구 내부의 현상도 다루는 학문이기 때문에 기존에 알고 있던 지구과학 지식은 물론 관련 자료를 찾아가면서 내용을 접해갔다. 특히 집중했던 것은 '지질 분야의 실생활 적용'과 '제4기 환경변화'이다. 답사나 지구과학, 지리 교육과정에서 어떻게 지질 데이터를 적용할 수 있는지 고민해봤다. 기본적으로 지질도는 암석의 분포를 표현해주는 지도로서 지형, 토양, 식생 등의 자연환경을 이해하는 데 기본이 된다. 답사에서도 이 지역에는 어떤 기반암이 내재되었는지 아는 것은 중요하다. 또 지구과학 교육과정 암석의 분포와 광물, 지구 물리(지열류량, 중력이상), 지진 등에 관한 것을 학습한다. 교과 지식을 실제 우리나라에 적용해보기 위한 자료로 오픈플랫폼의 데이터가 적합하다고 생각한다. 이러한 부분에 있어서 지구과학 교육 자료로 활용하는 것이 좋겠다고 판단하였다.

제4기 환경변화는 약 46억 년의 지구에서 상대적으로 짧은 시기이지만, 인간과의 관계가 가장 깊고, 기후변동이 빈번한 시기였기 때문에 당시 환경을 이해하면 앞으로의 환경변화도 예측할 수 있을 것이라는 기대가 있다. 기후변화, 해수면 변동, 제4기 퇴적층, 지형발달, 식생 분포, 화성활동, 단층운동 등은 관련 논문과 자료를 찾아보면서 흥미로운 주제로 다가왔고, 제4기의 환경을 연구해보고 싶다는 생각이 들기 시작했다. 지오빅데이터 오픈플랫폼 모니터링단으로 활동하면서 지질 관련 지식의 폭을 넓히고, 제4기 연구에 관심을 가지게 되었다. 다음 기회에 모니터링단 활동을 이어간다면 분기당 1회의 지질 관련 특강을 들어보고 싶다는 생각을 하여 이를 제안해본다.

<참고문헌>

지오빅데이터 오픈플랫폼, https://data.kigam.re.kr/

공우석, 2019, 우리 나무와 숲의 이력서, 청아출판사.

권동희, 2020, 한국의 지형, 한울.

이상목·문명대·장윤득·황상일·윤순옥·한상훈·손호상·하인수·황창한·최은아·최종혁, 2013, 한국의 암각화Ⅲ 울주 대곡리 반구대암각화, 울산암각화박물관.

한국지질자원연구원, 2012, 활성단층지도 및 지진위험 지도 제작, 소방방재청.

강가령·조형성·김현주·김선웅·손문·김진섭·백인성, 2014, 부산 국가지질공원의 지질명소와 지질유산의 가치: 지질탐방로를 중심으로, 지질학회지, 50(1), 21-41.

경재복·이기화·오까다 아쯔마사, 1999, 양산단층대의 고지진학적 연구 - 변위지형 분석 및 트렌치 조사 -, 지구물리, 2(3), 155-168.

김성중, 2008, 신생대 제4기 말기의 기후변동과 원인에 대한 고찰, 지질학회지, 44(1), 63-80.

김성환, 2005, 하구둑 건설 이후 낙동강 하구역 삼각주 연안사주의 지형변화, 대한지리학회지, 40(4), 416-427.

김영석·김태형·경재복·조창수·최진혁·최철웅, 2017, 9.12 경주지진의 지진발생기작 예비연구, 지질학회지. 53(3), 407-422.

김정윤, 2008, 고김해만 북서부 Holocene 후기 환경변화와 지형발달, 경북대학교 대학원 석사학위논문.

양재혁·조국래, 2011, 낙동강 하구 만입지의 지형발달, 한국지역지리학회지, 17(6), 649-665.

우병영, 1984, 양산단층의 지형학적 연구, 경북대학교 대학원 석사학위논문.

尹順玉·曺華龍, 1996, 第四紀 後期 英陽盆地의 自然環境變化, 대한지리학회지, 31(3), 447-468.

윤순옥·황상일, 1999, 한국 동남부 경주시 불국사 단층선 북부의 활단층지형, 대한지리학회지, 34(3), 231-246.

윤순옥·황상일, 2009, 한반도와 주변지역의 최종빙기 최성기 자연환경, 한국지형학회지, 16(3), 101-112.

이병석·유강민, 2001, 제4기 후기 황해 주변부의 식생 변화에 뚜른 화분 기록과 기후 변화, 지질학회지, 37(3), 365-374.

이석훈·김수진, 2004, 주기적으로 침수되는 퇴적암의 풍화특성, 한국광물학회지, 17(1), 23-35.

정무열, 2015, 밀양 수산제 일대 Holocene 지형발달과 환경변화, 경북대학교 대학원 석사학위논문.

黃相一·尹順玉, 2000, 蔚山 太和江 中·下流部의 Holocene 自然環境과 先史人의 生活 變化, 한국고고학보, 43, 67-112.

황상일, 2007, 불국사 지역의 지형특성과 불국사의 내진 구조, 대한지리학회지, 42(3), 315-331.

황상일·김정윤·윤순옥, 2009, 고김해만 북서지역의 Holocene 후기 환경변화와 지형발달, 한국지형학회지, 16(4), 85-99.

황상일·박경근·윤순옥, 2010, 반구대 암각화의 주기적인 침수와 구성암석의 풍화 특성, 대한지리학회지, 45(3), 342-359.

황상일·윤순옥, 2011, 해수면 변동으로 본 한반도 홀로세(Holocene) 기후변화, 한국지형학회지, 18(4), 235-246.

황상일·김정윤·윤순옥, 2013, 창녕 비봉리 지역의 Holocene 중기 해수면변동, 대한지리학회지, 48(6), 837-855.

황상일·윤순옥, 2020, 한국 남동해안 감포읍 지역 해안단구 지형발달, 한국지역지리학회지, 26(2), 336-349.

Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D. and Ogg, G. M. (Eds.), 2012, *The geologic time scale*

2012, Elsevier.

Hwang, S. I., Yoon, S. O. and Kim, J. Y., 2013, Geomorphological Development of Neolithic Archaeological Site in Bibongri, Changnyeong, South Korea, *Internatioal Association of Geomorphologist*, Poster.

Platt, D., Haber, M., Dagher-Kharrat, M. et al, 2017, Mapping Post-Glacial expansions: The Peopling of Southwest Asia, Sci Rep 7, 40338.

Qin Y., Zhao S., 1991, "New Process in Study of Sedimentation Model of China's Shelf Area", 1-20: in "Quaternary Coastline Changes in China" edited by Qin, Y., Zhao S., China Ocean Press, Beijing, 190pp.