

낙동강 하구 지하수 관정 주변 대수층의 리질리언스 평가

유순영¹ · 김호림¹ · 최은경^{2*} · 김성욱² · 류동우¹ · 김용철¹

¹한국지질자원연구원

²(주)지아이 지반정보연구소

Resilience Assessment for Aquifers close to Groundwater Wells in the Nakdong River Estuary

Soonyoung Yu¹ · Ho-Rim Kim¹ · Eun-Kyeong Choi^{2*} · Sung-Wook Kim²
Dong-Woo Ryu¹ · Yongcheol Kim¹

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 34132, Korea

²Geo-Information Institute, GI Co. Ltd., Busan 47598, Korea

ABSTRACT

Each national groundwater monitoring well showed distinct change patterns in groundwater levels and electrical conductivity (EC) in the Nakdong River Estuary, implying different external forces (*EFs*) on each well. According to the annual average data in 1997-2020, seawater was invaded into Well C. The desalination rate of $-1,062 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{year}$ represents the adaptive capacity of the well to seawater intrusion. The water levels and EC in Well E responded to precipitation, indicating the low absorptive capacity to climate changes. Meanwhile, Well B showed constant increases in water levels, suggesting that problems by rising groundwater should be considered in the study area where confined aquifers are overlaid by clay aquitards. The other wells showed consistent water levels and EC, indicating resilience to *EFs*. Here, resilience is the capacity of a well to resist changes by *EFs*, including the absorptive and adaptive capacity. The resilience of Wells E and F to climate changes was quantitatively compared using a resilience cost (*RC*). The *RC* showed Well F was more resilient than Well E, and the bedrock aquifer was more resilient than the alluvium aquifer, supporting the usefulness of *RC*. The resilience assessment against *EFs* (e.g., changes in land use and climate) helps sustainable groundwater management.

Key words: Groundwater, Resilience, Nakdong River Estuary, National groundwater monitoring well, Climate change

1. 서 론

1973년 생태학자 Holling은 생태계 시스템의 안정성(stability)과 리질리언스(resilience)를 설명하는 논문을 발표하였다. 2023년 6월 23일 현재 22,126회 인용된 이 논

문에서 Holling(1973)은 교란된 상태에서 평형상태로 되돌아갈 수 있는 능력을 안정성으로 정의하고, 안정된 시스템일수록 빠르게 회복되어 변동이 적다고 설명하였다. 이외에도 생태계 시스템은 변화와 교란을 흡수하여 생태계의 기능을 지속할 수 있는 능력이 있는데, 이와 같은 시스템의 지속성을 리질리언스로 정의하였다.

주저자: 유순영, 한국지질자원연구원 지하수환경연구센터, 선임연구원

공저자: 김호림, 한국지질자원연구원 자원탐사개발연구센터, 선임연구원

공저자: 김성욱, (주)지아이 지반정보연구소, 대표이사; 류동우, 한국지질자원연구원 자원탐사개발연구센터, 책임연구원; 김용철, 한국지질자원연구원 지하수환경연구센터, 책임연구원

*교신저자: 최은경, (주)지아이 지반정보연구소, 실장
Email: choiek@naver.com

Holling(1973) 이후 리질리언스는 기업의 업무 연속성 확보(Deloitte, 2019) 및 국가의 기후위기 대응과 재난재해 관리에 확대 적용되고 있는데(Cutter et al., 2008), 적용 분야에 따라 취약성(vulnerability), 적응력(adaptive capacity) 등과 혼동되어 쓰이기도 한다(Cutter et al., 2008). 대부분의 재난재해 연구자들은 리질리언스를 재난재해 관리능력을 강화하려는 의사결정과정으로 보고 있으며, 흡수력(absorptive capacity)과 적응력 이외에도 복구력(restorative capacity)을 포함하는 넓은 의미로 사용하고 있다(Vugrin et al., 2010; 2011; Yu et al., 2015; 2016; 2021).

Received : 2023. 06. 08 Reviewed : 2023. 06. 21

Accepted : 2023. 06. 27 Discussion until : 2023. 08. 31

리질리언스는 시스템의 특성이다. 시스템의 복잡성으로 인하여 연구자마다 달리 정의되어 사용되지만, 대체로 시스템이 외부력(external force; *EF*)에 의한 변화 압력에 저항하는 능력을 의미하는 개념으로 사용된다. 따라서 시스템(예: 지하수 환경)의 리질리언스를 평가하기 위해서는 시스템의 성능(system performance; *SP*; 예: 수위 또는 수질)을 위협하는 외부력(예: 기후변화, 과잉양수, 지하수 오염)과 외부력에 의한 성능 변화(예: 지하수위 하강, 수질 저하)를 측정할 수 있는 척도(예: 지하수위, 전기전도도(electrical conductivity; EC)) 등이 정의되어야 한다 (Table 1).

토양과 지하수 환경 연구에도 리질리언스 개념이 적용되고 있다. 토양 환경의 경우, 리질리언스는 지속가능한 토지이용과 관련하여 농업 분야에서 연구되기 시작하였다 (Greenland and Szabolcs, 1994; Seybold et al., 1999; Blanco-Canqui and Lal, 2010; Bonetti et al., 2017). 이외에도 토양은 국가, 지역사회, 도시의 리질리언스를 평가할 때 자연계 시스템의 주요한 요소로 다루어지기도 한다 (Godschalk, 2003; Linstadter et al., 2016; Béné et al., 2018). 지하수도 지역사회의 리질리언스를 확보하는데 필요한 중요한 수자원으로 연구되고 있다 (Foster et al., 2020). 예를 들어, Calow et al. (2010)은 기후변화(가뭄)에 대한 아프리카 농촌지역의 리질리언스를 확보하기 위해서는 지하수 대수층을 활용하는 것이 중요하다고 설명한다. 기후변화 및 도시개발에 따른 수자원 시스템의 리질리언스 확보 관점에서 지하수 리질리언스가 직접 연구되기도

한다 (Maurice et al., 2010; MacDonald et al., 2011; Cuthbert et al., 2019; Shrestha et al., 2020). 특히, 영국 지질조사소(British Geological Survey)가 지하수가 중요한 수자원인 아프리카 및 남아시아에서 지하수 리질리언스를 확보하기 위해 활발히 연구하고 있다. MacDonald et al. (2011)은 지하수 자원의 리질리언스와 개별 수원(관정)의 리질리언스를 구분하여 평가하였으며 (Table 1), 단기 외부력(예: 가뭄)과 장기 외부력(예: 기후변화)에 대한 리질리언스를 구분하여 논의하였다.

국내의 경우, 2010년 무렵부터 리질리언스는 복원력, 회복력, 회복탄력성, 방재력 등으로 번역되어 기후위기 대응 및 재난재해 관리에 이용되고 있다. 최근에는 토양 (Kim et al., 2020a; 2020b) 및 지하수 (Yu et al., 2021) 연구 분야에도 리질리언스 개념이 소개되었다. Kim et al. (2020a)은 농업환경 분야에서 토양 리질리언스를 다룬 국내외 논문들을 정리하며, 선행 연구에서 제시된 주요 스트레스 또는 교란 요인(외부력)을 자연적 요인과 인위적 요인으로 나누어 정리하였다. Kim et al. (2020b)은 농업환경 분야에서 토양 리질리언스 평가에 활용되는 토양의 물리적, 화학적, 생물학적 특성들을 정리하고, 특성 자료들을 가공한 사례와 방법을 정리하였다. 또한 농업, 환경, 생태 분야에서 정의된 토양 리질리언스를 정리하고 있다. Yu et al. (2021)은 지하수 오염 및 유출 지하수를 지하수의 수질 및 수량을 변화시킬 수 있는 외부력으로 보고, 지하수 시스템의 리질리언스를 평가할 수 있는 정성적 요소들 (흡수력, 적응력, 복구력 평가 요소들)을 살펴본 후 정량

Table 1. Components for resilience assessment in various research fields

System	External force	Measurement of changes in system performance (SP)	Reference
Soil microbial communities	Soil contamination	Sequencing of the 16S rRNA amplicon, shotgun metagenomics	Jiao et al. (2019)
		Microbial biomass, CO ₂ , hydrocarbon	Franco et al. (2004)
		Metagenomic DNA extraction, taxonomic profiling	Patel et al. (2016)
		Groundwater recharge, groundwater level	Shrestha et al. (2020)
Groundwater	Climate change	Precipitation, recharge	Cuthbert et al. (2019)
		Effective porosity, saturated thickness	MacDonald et al. (2011)
		Groundwater storage, permeability of aquifers	
Groundwater (Borehole)	Climate change	Concentration of pollutants	Yu et al. (2021)
	Withdrawal	Groundwater level	
Region	Natural hazards	Losses, recovery costs	Yu et al. (2015)
Country (South Korea)	Baekdusan Mountain eruption scenarios	Direct and indirect losses, health damage, recovery costs	Yu et al. (2016)
Water supply of urban Africa	Urban growth, climate change	Aquifer productivity potential	Foster et al. (2020)
Petrochemical supply chains	Hurricane	Market value of production, recovery costs	Vugrin et al. (2011)

적으로 평가할 수 있는 방법으로 리질리언스 비용(resilience cost; **RC**)을 제시하였다.

그러나 아직 국내에서 지하수 환경의 리질리언스를 평가한 사례는 전무하다. 따라서 이 연구에서는 국가지하수 관리측정망 자료를 이용하여 지하수 리질리언스를 평가하고, 정량적 평가 방법으로써 리질리언스 비용(**RC**)의 유용성을 살펴본 후, 앞으로 연구되어야 할 요소들을 논의하였다. 리질리언스는 시스템(예: 지하수 환경)의 '능력'으로 구체적으로 정의하기 쉽지 않고, 시스템의 다차원적인 특성으로 인하여 정량적 평가는 더욱 어렵다. 그러나 기후 변화 및 토지이용 변화와 같은 외부 환경의 변화로 인하여 지하수 환경은 변화 압력을 받고 있다. 수자원 확보 및 지하환경 보호를 위해 지하수 리질리언스를 확보할(즉, 어떠한 외부력에도 수질적 및 수량적 변화가 적거나 변화 후에 빠르게 회복될 수 있도록 할) 필요가 있으며, 이를 위해서는 지하수 리질리언스를 평가할 수 있어야 한다.

2. 연구방법

정성적인 관점에서 보면, 지하수 리질리언스는 시스템의 흡수력, 적응력, 복구력으로 평가할 수 있다(Yu et al., 2021). 여기서 복구력은 시스템을 원래 상태로 회복시키기 위해 외부에서 조달되는 복구자원의 양 또는 조달 속도이다. 시스템의 변화가 지하수위 강하일 경우, 인공함양

기술의 수준 및 조달 능력이 복구력이 될 수 있고, 지하수 수질 악화일 경우, 지하수 정화 기술의 수준 및 조달 능력이 복구력으로 평가될 수 있다. 이 연구는 국가지하수 관리측정망의 모니터링 자료를 활용하였기 때문에 복구력은 고려할 수 없었다. 따라서 외부력 발생 시 흡수력(예: 내구성)과 적응력(예: 자연회복력)에 의해 나타나는 시스템의 성능(**SP**) 변화(System impact; **SI**)만을 평가하였다.

리질리언스를 평가하기 위해서는 평가 대상 시스템의 성능(**SP**)에 영향을 미치는 외부력을 정의하고, 성능의 변화(**SI**)를 평가할 수 있는 관찰변수를 정의해야 한다(Table 1). **SI**는 시스템 성능(예: 수위, 수질)의 목표치(Targeted **SP**; **TSP**)와 현재 성능(**SP**)의 차이로, 수위 하강(또는 상승)의 규모 또는 EC 증가의 규모로 평가하기로 한다. 이때 **TSP** 설정이 중요한데, 대수층에 대한 지하수 전문가의 판단이 요구되는 부분으로 이 연구에서는 심도 있게 다루지 않았다. 지하수위의 경우, 자연수위 또는 안정수위가 활용될 수 있으며, 지하수 수질의 경우, 배경치 또는 수질기준을 활용할 수 있다.

2.1. 리질리언스 평가 시스템

이 연구에서는 낙동강 하구 주변 지하수 환경을 리질리언스 평가 시스템으로 선정하였다(Fig. 1). 낙동강 하구는 하구둑(estuary barrage), 보(weir) 등의 인공시설물 건설

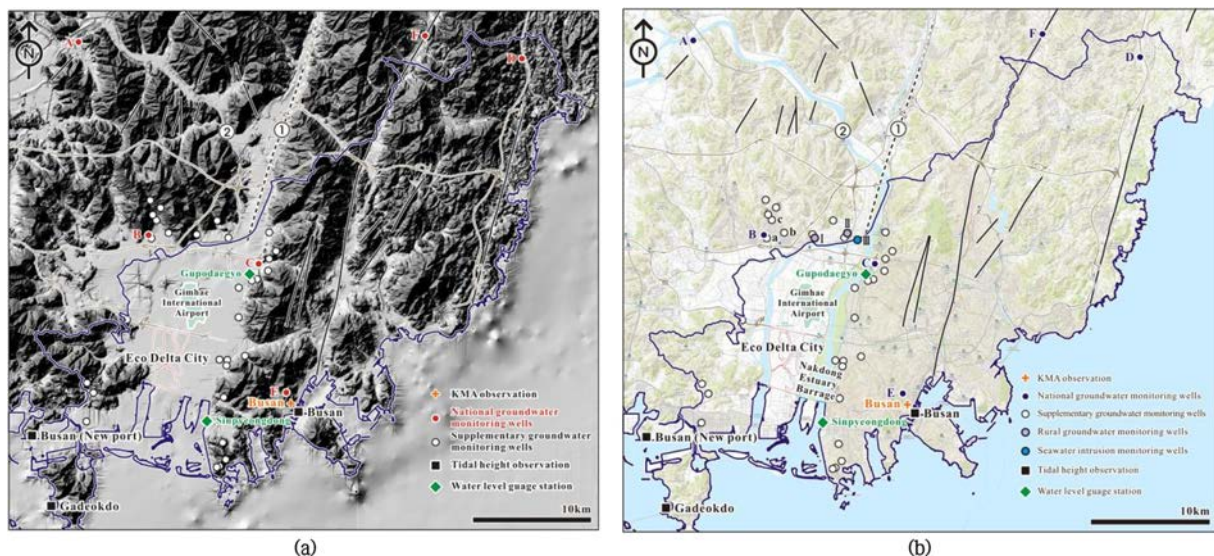


Fig. 1. Locations of monitoring wells (national (A to F), supplementary ($n=28$), rural (I, II) groundwater, and seawater intrusion (III)) and monitoring stations for tidal levels (Busan, Busan (New port), Gadeokdo), surface water levels (Gupodaegyo, Sinpyeongdong), and weather (Busan): (a) Shaded relief map, (b) Topographic map. ① indicates the Yangsan fault, while ② indicates the Nakdong River. In (b), the location of Nakdong Estuary Barrage is displayed, while a, b, and c represent three supplementary groundwater monitoring wells close to Well B.



Fig. 2. Morphological changes near the Nakdong Estuary Barrage.

과 매립 및 준설 등 인위적인 활동에 많은 영향을 받고 있다(Yoon et al., 2017). 낙동강 하구둑은 1983년 9월에 착공하여 1987년 11월에 완공되었는데, 하구둑 조성을 위한 물막이 공사와 준설 작업으로 삼각주 말단에 큰 변화를 가져왔다(Busan Metropolitan City, 2015). Fig. 2는 하구둑의 영향으로 장방형의 사구(sand dune)는 사라지고 남쪽으로 하구의 규모가 증가되었음을 보여준다. Kim (2005)은 하구둑 건설 이후 낙동강 하구역 삼각주 연안사주(nearshore sandbar)의 지형변화를 성장/정체/퇴적 양상으로 나누어 분석하였는데, 하천수의 유출이 이루어지고 있는 낙동강 본류의 하구를 중심으로 해안선을 형성하고 있는 연안사주에서는 성장 양상을 제시하였다. 하구의 퇴적상은 하천 에너지, 조석 에너지, 파랑 에너지 간의 관계로 결정된다. 낙동강은 전형적으로 하천 에너지가 우세한 환경이었으나, 하구둑이 만들어지면서 상대적으로 조석과 파랑 에너지의 개입이 증가하여 하천의 하구에 모래 퇴적이 많아진 것으로 보인다.

Yoon et al.(2017)은 2013년부터 2015년까지 하구로 유입되는 담수와 해수를 연구한 결과, 하구로 유입되는 방류량은 보 건설 전에 비해 현저히 감소하였고, 평균 염분은 증가하여 기수역(brackish water zone)이 감소한 결과를 제시하였다. 이는 연구지역 지하수의 수위 및 수질에도 영향을 미칠 수 있다. 이외에도 낙동강 하구는 조석의 영향이 미치는 지역으로, 이 지역 지하수위는 강수 이외에도 조석의 영향을 받아 변동할 수 있다. Kim et al. (2015)은 낙동강 하구 조간대에 위치한 진우도 지하수의 지하수위 및 수온 변화가 조석의 영향을 받으며, 5,000 m³/sec 이상의 하천수 방류량은 지하수위를 상승시킬 뿐만 아니라 지반 내 수십 cm 깊이의 지하수 염분을 감소

시킨다고 제시하였다. 동일한 지역에 대한 Park et al.(2016)의 연구 결과, 강수 발생 시 지하수위가 즉시 상승하는 것을 확인할 수 있었다.

2.1.1. 연구지역의 지질

낙동강 삼각주는 경상분지 밀양지괴의 남동부에 해당하며 중생대 백악기 퇴적암류를 기저로 이를 관입 분출한 화산암과 이후 관입한 화강암류로 구성되어 있다(Fig. 3a). 낙동강 하구는 북북동-남남서 방향(부산-양산-경주-영덕)으로 발달하는 양산단층(① in Figs. 1 and 3)의 남단에 위치하며 기반암의 모양은 단층 작용에 의한 침식분지를 형성하고 있다(Kim et al., 2002a). 분지를 충전하는 퇴적물은 하성 및 내만(inner bay)성의 미고결 지층으로, 입자의 크기에 따라 사질토층과 점성토(연약점토)층으로 구분된다(Chung et al., 2003). Jo(1997)에 따르면, 연구지역의 충적층은 비빙하(interglacial) 시기의 침식곡이 하천퇴적물에 의해 이적(transport and deposition)되는 과정에서 형성되었다. 국토지반정보 통합DB센터(geoinfo.or.kr)의 시추정보와 부산 제4기 지질도(KIGAM, 2021)에 따르면, 낙동강 삼각주 퇴적층은 지역에 따라 두께의 차이를 보이며 가덕도 일원에서 최대 80m에 달한다. Won et al.(2015)은 낙동강 하구 델타지역의 퇴적층을 80 m 이상으로 보고하고 있다.

퇴적상(sediment facies)은 해수면의 상승 속도와 퇴적물의 공급량에 따라 달라지며, 해수면의 상승과 하강은 지각의 성장과 쇠퇴, 기후변동, 빙하 등 여러 요인에 의해 반복된다. Fig. 3b는 낙동강 삼각주 일원에서 획득된 시추 자료를 이용하여 위치별 퇴적상을 나타낸 것으로(Kim et al., 2006a; 2011), 미고결 퇴적층은 해수면 아래 60 m 깊

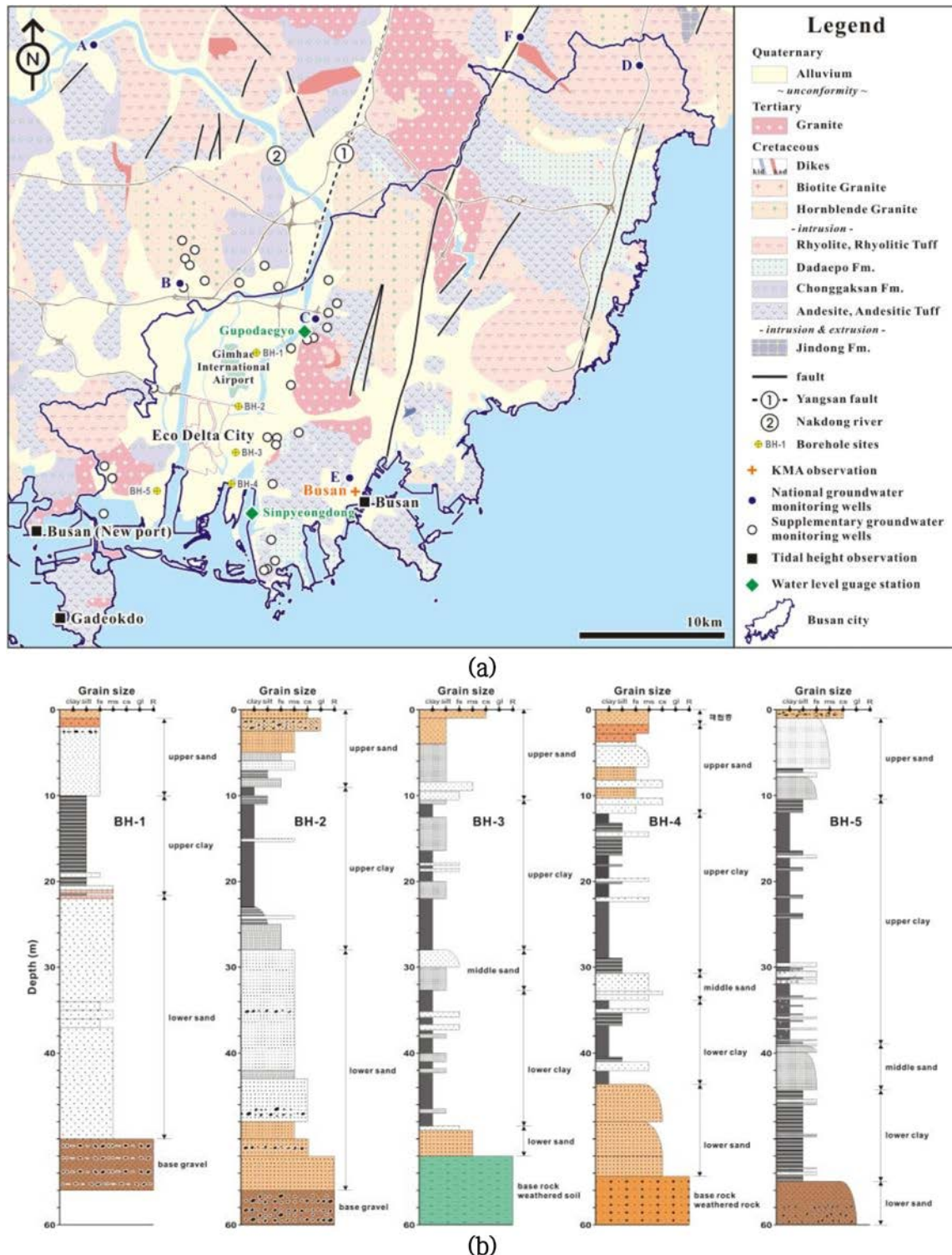


Fig. 3. Geology: (a) Geology map, (b) Geologic column for the 60 m depth below ground surface in BH-1~5 in (a).

이까지 분포하고 있다. 미고결 퇴적층의 두께는 북에서 남으로 갈수록 증가하며 이는 양산단층의 침식된 골짜기가 북에서 남으로 갈수록 깊어지는 것으로 해석된다.

낙동강 삼각주의 점성토층은 해수면의 상승 속도가 빠른 시기에 퇴적된 지층으로(Park, 1992), Kang et al. (2000)은 낙동강 삼각주의 내만성 점토층에 대한 미화석

동정을 통해 퇴적연대가 홀로세(Holocene) 중기에 해당하는 것으로 추정하였다. 퇴적상에서 점성토는 심도 30m 정도에 분포하는 사질토를 경계로 상부와 하부 점토층으로 구분된다. 퇴적층의 상부점토는 주로 해성환경 하에서 퇴적되었으며, 하부점토는 저해수면 시기에 퇴적된 지층으

로 담수 영향을 많이 받은 것으로 보고된 바 있다(Kim et al., 2002b). 홀로세 동안 형성된 다른 나라의 점토와 비교하면 상부점토는 약간의 과압밀로 더 고결되어 있으며, 하부점토는 정규압밀로 유사한 특성을 보인다(Chung et al., 2006).

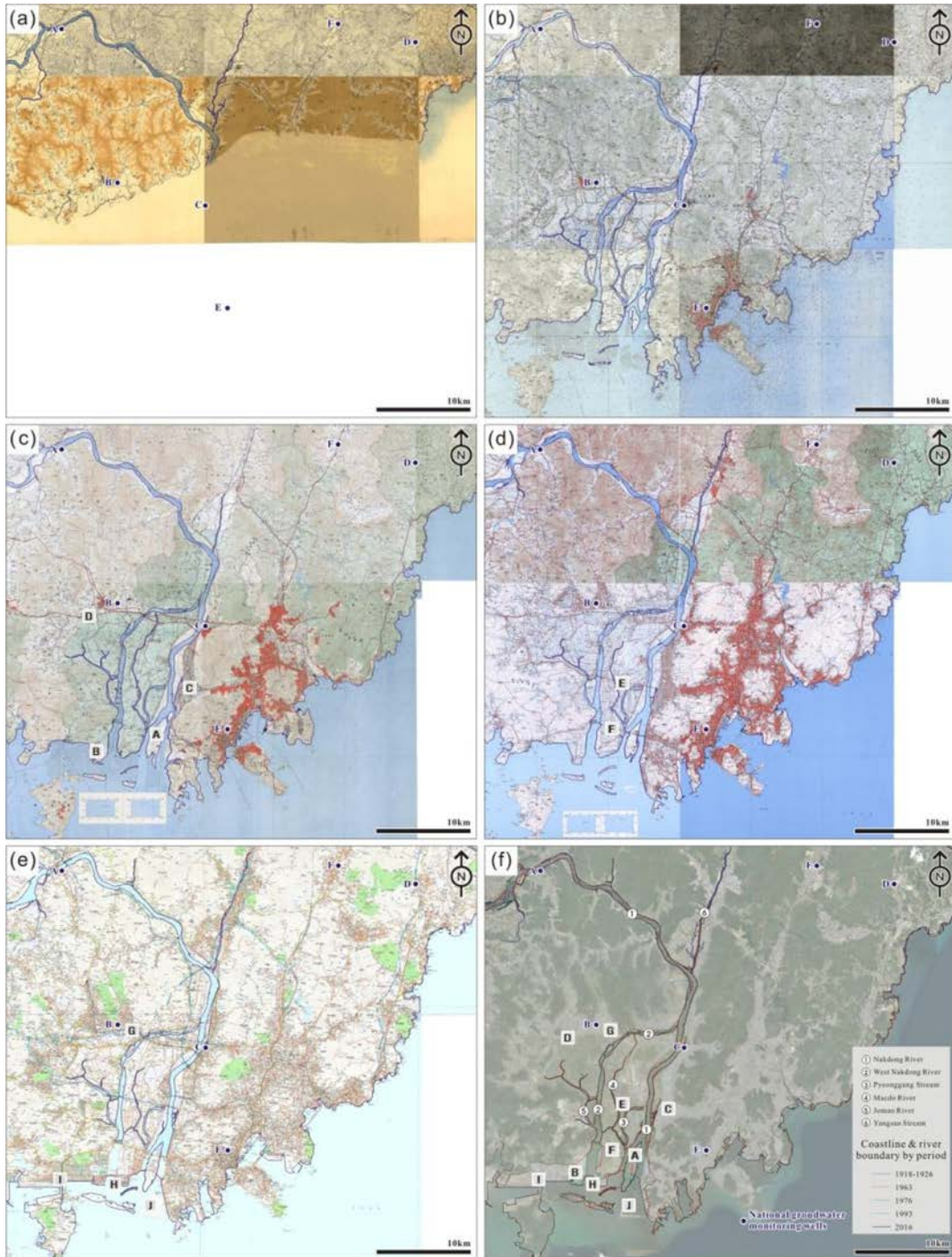


Fig. 4. Morphological changes in the study area: (a) 1918-1926, (b) 1964, (c) 1976, (d) 1993, (e) 2016, (f) Temporal changes in coastline and river boundary.

이들 점성토층에 의해 낙동강 조간대의 대수층은 자유면 대수층과 피압 대수층으로 구분되며(Won et al., 2015; Chung et al., 2020), 대단위 매립공사와 부지조성 공사를 수행하는 과정에서 점성토 지반 하부 사질토층이 피압된 경우가 많이 확인되었다(Kim et al., 2006b). Chung et al.(2020)에 따르면, 자유면 대수층의 지하수는 산화 환경에서 CaSO_4 유형에 해당하며, 피압 대수층의 지하수는 환원 환경에서 NaCl 유형에 해당되어 해수침투의 영향을 많이 받고 있다는 것으로 나타났다.

2.1.2. 지형 변화 분석

연구지역에는 낙동강(① in Fig. 4f)과 서낙동강(② in Fig. 4f)이 맥도강(④ in Fig. 4f)과 평강천(③ in Fig. 4f)에 의해 동-서 방향으로 연결되며, 이외에도 서낙동강으로 유입되는 조만강(⑤ in Fig. 4f)과 낙동강으로 유입되는 양산천(⑥ in Fig. 4f)이 있다.

제작연도가 다른 지형도를 이용하여 수계의 변화 및 총적지의 분포범위와 지형변화를 파악하였다(Fig. 4). 과거 지형은 광복 이전, 1964년, 1976년, 1993년, 2016년 발간된 1/5만 지형도를 이용하여 Global mapper로 정사 보정 후 비교하였으며, 현재 지형을 확인하기 위하여 2022년 촬영된 위성영상을 이용하였다. 광복 이전의 지형도에는 낙동강 조간대 지역의 지도가 구축되어 있지 않으나(Fig. 4a), 이후 제작된 지형도에서는 수계의 변화와 국토 개발에 따른 해안선의 변화가 잘 나타난다. 1976년 하중도였던 을숙도(㉠ in Fig. 4c)는 현재와 같은 형태를 갖

춘 것으로 보이며, 신호 및 화전 일반산업단지가 있는 지역(㉡ in Fig. 4c)이 매립되었다. 또한 사상지역(㉢ in Fig. 4c)이 도심화되었으며, 남해고속도로가 개통(㉣ in Fig. 4c)된 것이 확인된다. 1993년에는 ㉤, ㉥와 같이 조간대를 관통하는 도로와 교량이 건설되었다(Fig. 4d). 2016년에는 현재와 거의 유사한 수준으로 개발이 완료된 모습을 볼 수 있는데(Fig. 4e), 부산김해 경전철(㉦), 명지주거단지(㉧)가 건설되었으며, 녹산공단지구, 명지녹산국가산업단지, 부산항신항(㉨)과 이를 연결하는 도로와 철도의 건설과 같은 대규모 개발공사가 진행되었다. 2023년 현재, 조사지역에서는 서천테이너와 웅동지구의 매립공사가 진행 중이며, 강서구에서 에코델타시티 개발이 진행되고 있다(Fig. 1).

2.2. 리질리언스 평가 자료

2.2.1. 시스템 성능 변화 측정

시스템의 성능(SP)은 연구지역 주변에 위치한 7개 국가지하수관리측정망의 지하수위 및 EC 자료로 측정하였다(Table 2). 측정망별로 설치연도가 달라 2005-2020년 관찰된 연평균 자료를 기본으로 하고, 그 이외 기간 자료는 자료 해석에 추가 활용하였다. 이외에도 국가지하수관리측정망의 수온 자료와 보조지하수관측망 28개소의 온도, 지하수위, EC 자료 및 농어촌지하수관측망 3개소의 지하수위 및 EC 자료를 참고하였다(Fig. 1).

국가지하수관리측정망의 경우 일반오염물질 및 특정유해물질이 매년 상반기와 하반기 2차례 분석되고, 이화학

Table 2. National groundwater monitoring wells within the study area

Well	Type	Year of installation	Elevation (EL, m)	Drilling depth (m)	Mean \pm standard deviation (min-max) of annual average data in 2005-2020 (n=16)	
					Groundwater level (EL, m)	Electrical conductivity (EC, $\mu\text{S}/\text{cm}$)
A	Bedrock	2004	9.88	70	2.99 \pm 0.26 (2.45 ~ 3.39)	251 \pm 39 (179 ~ 352)
B	Bedrock	1995	5.00	70	-1.50 \pm 4.30 (-6.57 ~ 4.07)	442 \pm 94 (246 ~ 541)
C	Bedrock	2004	5.42	70	-7.89 \pm 1.98 (-14.41 ~ -6.13)	11,747 \pm 6,865 (5,892 ~ 24,805)
D ¹⁾	Bedrock	2003	58.90	70	52.78 \pm 0.29 (51.97 ~ 53.05)	339 \pm 57 (215 ~ 417)
E	Bedrock	1997	141.28	168	104.69 \pm 1.21 (102.91 ~ 106.91)	449 \pm 28 (412 ~ 516)
F-b	Bedrock	2004	114.60	70	109.05 \pm 0.22 (108.71 ~ 109.38)	426 \pm 35 (333 ~ 489)
F-a	Alluvial	2004	114.62	10	110.63 \pm 0.26 (110.08 ~ 111.07)	325 \pm 48 (238 ~ 422)

¹⁾ no data in 2019-2020

분석은 매년 한 차례 분석된다(2020년 이후 두 차례 분석). 이들 자료는 외부력(해수침투, 도시 지하수의 오염 등)을 확인하는 데 활용하였다.

2.2.2. 외부력 평가

지하수위 및 EC 변화를 해석하는 과정에서 관찰변수에 영향을 미치는 외부력(예: 기후변화, 해수침투, 도시개발)을 판단하였다. 이 연구는 연평균 자료를 사용하였으므로(Table 2), 계절변화와 일변화에 영향을 미치는 요소는 제외하였다. 특히 여름철 집중 강수는 하천수위(Fig. 5)는 물론 지하수위에도 영향을 줄 수 있으나, 이는 계절변화에 해당하므로 외부력 평가에서 제외하였다. 해수면의 상승도 지하수위 및 수질에 영향을 미칠 수 있으나(Anderson, 2017), 조사 기간 동안 눈에 띄는 해수면 변화는 관측되지 않았다. 또한 하천수위에서 조석의 영향은

관찰되지 않았고, 강수량의 영향만 관찰되었다(Fig. 5). 따라서 조석의 영향도 외부력 평가에서 제외하였다.

2.2.3. 리질리언스의 정량적 평가 방법

리질리언스의 정량적 평가에는 리질리언스 비용(RC)(식 1)을 활용하였다(Yu et al., 2021).

$$RC = \frac{SI + \alpha RE}{TSP} \quad (1)$$

여기서 RE 는 복구 노력(recovery effort)의 규모로 복구력을 대변하며, α 는 단위 환산 계수로서 가중치로도 활용될 수 있다. 또한, 초기 상태(시스템의 규모)가 서로 다른 시스템들의 리질리언스를 비교하기 위해, SI 와 RE 의 합을 목표치(TSP)로 나누어 평가한다. RC 가 작을수록 더 리질리언스 한(즉, 외부력의 변화 압력에도 불구하고 변화가

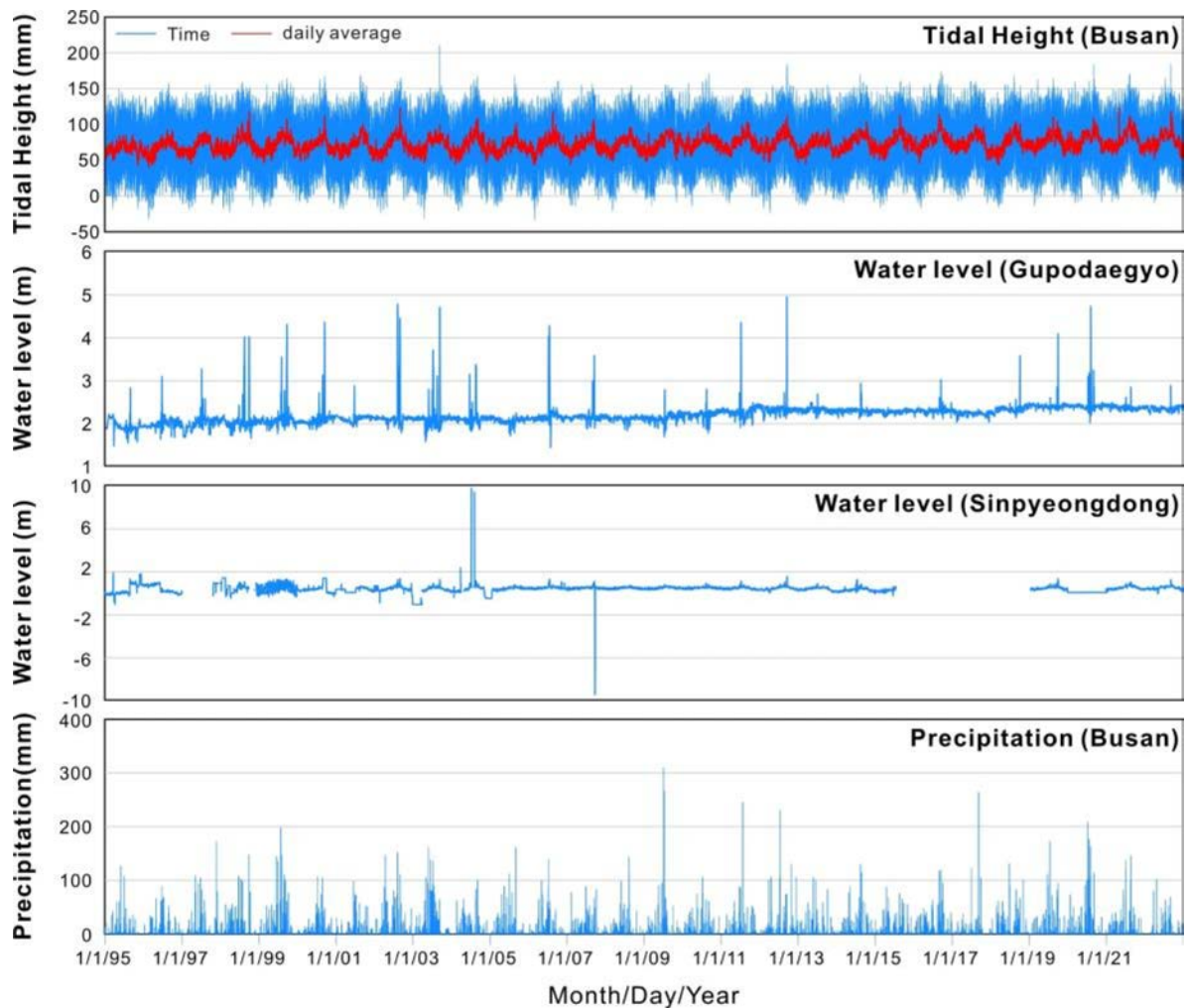


Fig. 5. Daily variations of tidal heights at a tide monitoring station (Busan), surface water levels at Gupodaegyo and Sinpyeongdong, and precipitation at a weather station (Busan) in 1995-2022. See Fig. 1 for the locations of monitoring stations.

없거나 변화하더라도 빠르게 회복하는) 시스템으로 평가된다.

3. 연구결과

3.1. 국가지하수관리측정망의 지하수위 및 EC 변화

지하수관측연보(2020년부터는 측정연보)에 보고된 연평균 자료를 살펴보면 7개 관측정에서 관찰된 지하수위 및 EC와 온도 변화는 각각 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다. 해발고도 100 m 이상의 높은 곳에 위치한 관측정 E와 F의 경우, 높은 지하수위(> EL 100 m)를 보이는 반면, 58.9 m에 위치한 관측정 D의 지하수위는 평균 EL 52.78 m로 나타났다(Table 2). 해발고도가 10 m 이하로 낮은 곳에 위치한 관측정 A, B, C에서의 지하수위는 -7.9~3.0 m로 낮게 나타났다(Table 2). 이는 지형구배가 수리구배에 영향을 미친 결과로 보이나, 지질구조(예: 단층)의 영향도 있을 것으로 판단된다. 관측정 A와 B는 양산단층의 서쪽, 관측정 D-F는 단층의 동쪽에 위치하며, 관측정 C는 단층의 연장선에 위치한다(Fig. 1).

관측정 C의 경우, 지하수위가 해수면 아래에 위치하는데(Fig. 6), 이 관측정의 경우, 다른 지역에 비해 EC가 높게 나타났다(Fig. 7). 이외에도 관측정 C에서는 Cl 농

도가 1,000 mg/L를 초과하고 Na/Cl 몰 비율은 해수의 0.86과 유사하거나 낮으며(Fig. 8a; 2015년 11월에 채수된 시료는 예외), 높은 Cl 농도로 인하여 SO_4/Cl 비율이 낮은 특성을 보인다(Fig. 8b). Cl/HCO_3 의 경우, 6.6보다 높다(Fig. 8c). 이와 같은 특성은 관측정 C가 해수의 영향을 많이 받고 있음을 지시한다(Mtoni et al., 2013; Kharroubi et al., 2014; Bergh and Compton, 2015). EC가 비교적 높은 다른 관측정(예: 관측정 B, E)의 경우에는 해수의 영향이 크지 않은 것으로 보이며, Cl과 함께 NO_3-N 가 높아지는 도시 지하수의 오염 형태를 보인다(Fig. 8d).

한편, 관측정 A와 F는 비교적 일정한 지하수위 및 EC 패턴을 보이고 있어 외부력의 영향을 받지 않거나, 외부력의 영향에도 불구하고 안정성과 지속성을 보이는 관정으로 판단된다. 즉, 어떠한 외부력에도 변화량이 적거나 변화하더라도 빠르게 회복할 수 있는 능력인 리질리언스가 확보된 관정으로 판단된다.

3.2. 관측정별 외부력 평가

관정별로 지하수위 및 EC의 변화 양상이 상이하고(Figs. 6 and 7), 연구지역에는 해수침투, 기후변화, 도시개발 등 여러 가지 외부력이 지하수 환경에 영향을 미칠

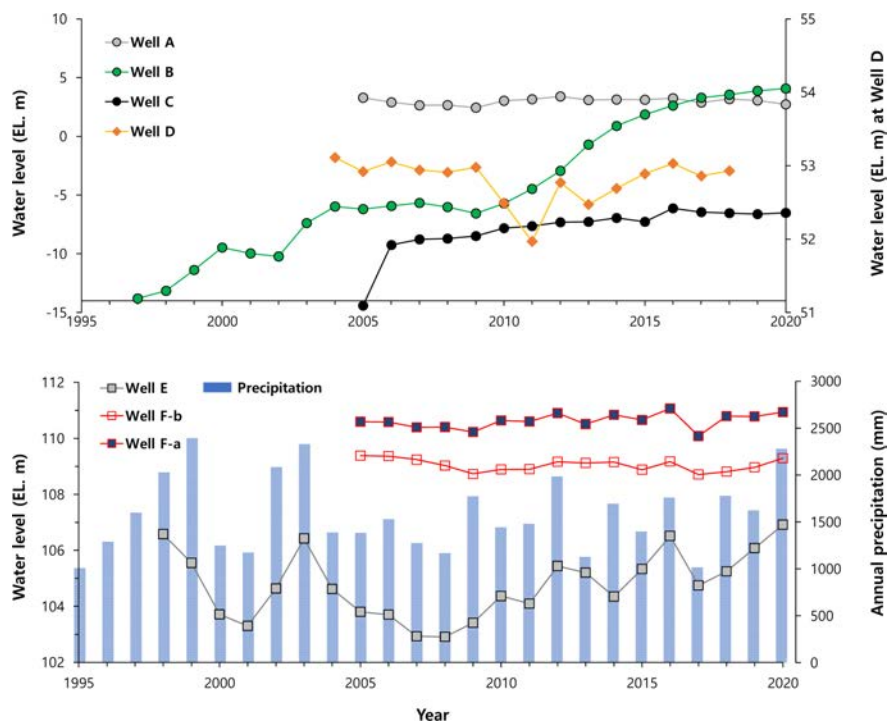


Fig. 6. Annual average of groundwater levels and annual precipitation. Note that the range of water levels at Well D is denoted on the right axis due to different ranges.

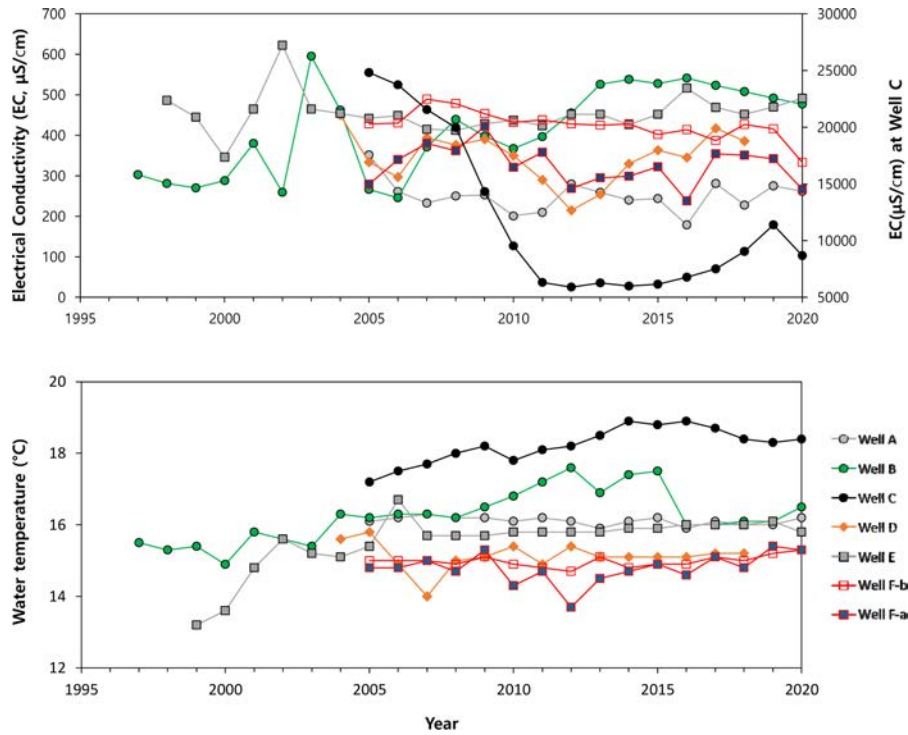


Fig. 7. Annual average of electrical conductivity (EC) and temperature. Note that the range of EC at Well C is denoted on the right axis due to high values.

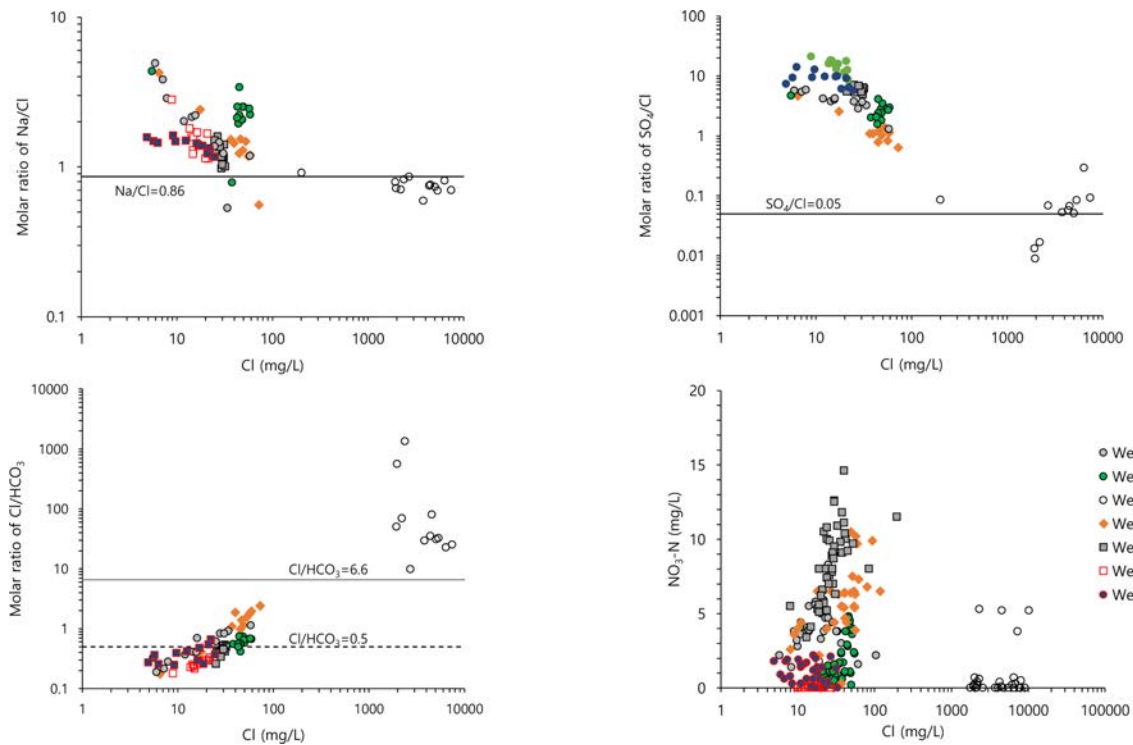


Fig. 8. Hydrochemical characteristics. The comparison of Cl with Na/Cl (a), SO_4/Cl (b), Cl/HCO_3 (c), and $\text{NO}_3\text{-N}$ (d). In (c), the sample obtained from Well C on November 2015 whose Cl was 201 mg/L was not shown due to no HCO_3 data. The number of data in (d) almost doubles that in (a) to (c) since the water quality including $\text{NO}_3\text{-N}$ was analyzed twice a year while the major ions were once a year.

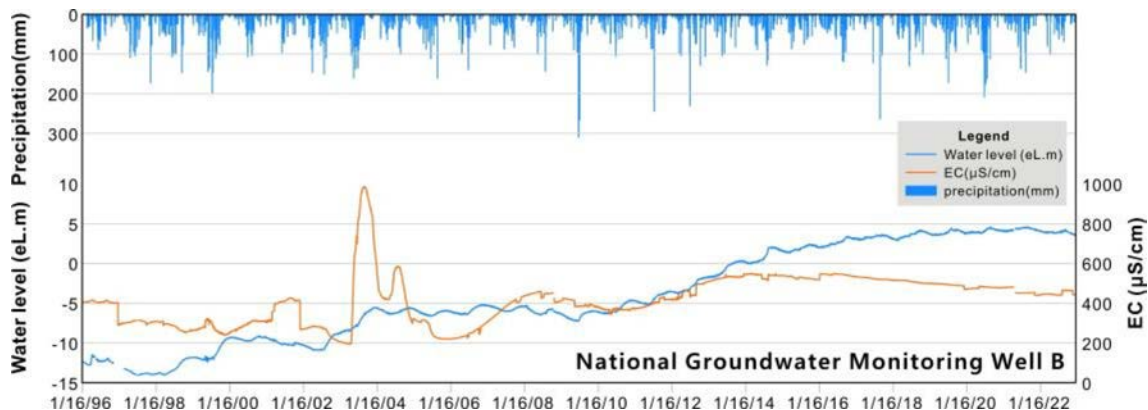


Fig. 9. Daily variations of EC and groundwater levels at Well B until December 31, 2022.

수 있다는 것을 고려할 때, 관정별로 여러 가지 외부력들이 서로 다른 비중을 가지고 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이에 낙동강 조간대 대수층의 경우, 관정 주변의 대수층 리질리언스를 따로 평가할 필요가 있을 것으로 보인다. 관측정 주변의 대수층 리질리언스를 평가하기 위해 지하수위 및 EC의 변화량이 상대적으로 큰 관측정(B, C, E)의 지하수위 및 EC 변화량을 분석하고, 이를 통해 변화요인(외부력)을 판단해 보았다.

3.2.1. 관측정 B

관측정 B는 다른 관측정과 달리 지속적으로 지하수위가 상승하는 패턴을 보여주고 있다(Fig. 6). 2003년 EC도 크게 증가하여 2013년부터는 비교적 높은 EC를 지속적으로 보여준다(Fig. 7). 지속적인 수위 상승 현상은 일반화 자료에서도 관찰된다(Fig. 9). 관측정 B 주변의 보조관측망 자료 및 농어촌지하수관측망 자료를 이용하여(Fig. 1), 유사 현상을 확인하려 하였으나, 보조관측망의 경우 2013년 이전에 관측된 자료가 없고, 농어촌지하수관측망의 경우 최근 2년 자료만 확인 가능하여, 지하수 상승이 관측정 B 주변에서 일어나는 일반적인 현상인지를 확인할 수 없었다.

자연적인 요인에 의해 상승한 지하수위는 일반적으로 짧은 시간에 걸쳐 관찰되나, 인위적 요인에 의해 상승한 수위는 긴 시간에 걸쳐 관찰되거나 영구적인 현상이 된다(Becker et al., 2022). 따라서 관측정 B에서 관찰되는 지하수위 상승은 인위적 활동(예: 상하수도 및 관개용수 누수, 지하수 양수량 변화, 수리공학적 개입 등)의 영향으로 판단된다.

관측정 B에서 관찰되는 지하수위 상승의 원인을 파악하기 위해 관측정 B 주변의 지형, 지질, 토지이용도, 도시

개발이력 등을 살펴보았다. 관측정 B는 경상남도 김해시 삼정동 00초등학교(1948년 개교) 부지 가장자리에 설치된 암반 관정으로, 지표 아래 70 m까지 굴착되었다(Table 2). 연구지역에는 연약점토층이 두껍게 분포하고, 상부 및 하부에 모래층이 존재하는 지역이 많은 것을 고려할 때(Fig. 3b), 관측정 B는 피압대수층에 설치된 관정일 것으로 판단된다. 관측정 B의 동편으로 신어천이 남향하는데, 관측정 B와 신어천 사이에 설치된 보조관측망(Fig. 1b의 관측정 a)이 100 m 심도의 충적층 관정인 점을 고려할 때, 신어천 방향으로 갈수록 충적층이 두꺼워지는 것으로 보인다. 한편, 00초등학교에서는 생활용 관정(굴착심도 150 m, 동력장치 5마력, 양수능력 95 m³/일, 취수계획량 76 m³/일)에서 지속적인 양수가 이루어진 것으로 보이며, 이로 인해 관측정 B가 설치된 직후 관찰된 수위(약 EL -14 m)는 자연수위에서 많이 하강한 상태였을 것으로 추정된다. 관측정 B가 설치된 이후 도시화가 진행되면서 지하수 함양량이 증가하거나(예: 상하수 누수) 배출량이 감소하는 현상(예: 차수)으로 인하여 지하수위가 상승했을 수 있으며, 광역상수도의 공급 등으로 학교 부지 내 생활용 관정을 포함하여 주변의 지하수 양수량이 감소하면서 지하수위가 지속적으로 상승했을 수도 있다. 추후 지하수위에 영향을 미칠 수 있는 자연적 또는 인위적 인자들 간의 공간적 상관분석 및 시계열 변수 간의 교차 상관분석을 통해 지하수 상승 원인에 대한 정확한 판단이 필요하다.

지금까지 지하수 문제는 기후변화로 인한 지하수위 하강과 그로 인한 지질재해(예: 지반침하)에 초점이 맞추어져 연구되어 왔으나, 최근 지하수위 상승과 그로 인한 지질재해(예: 침투, 액상화, 홍수)도 주목을 받고 있는데(예: Allocca et al., 2016; Bob et al., 2016; Emhanna et

al., 2021; Yao et al., 2021), 관측정 B 주변으로 관련 현상에 주목할 필요가 있을 것으로 보인다. Yao et al. (2021)은 과다 양수로 지하수위가 급강하고 지반침하 문제가 발생했던 중국 시안(Xi'an)에서 지하수 양수량 제한, 인공함양, 지표수 사용 등으로 2003년 이후 지하수위가 회복되는 것을 확인하였는데, 자연적인 요인(예: 강수량, 수리지질학적 특성) 및 인위적인 요인(예: 매립토, 인공함양, 토지이용변화)에 의해 지하수위 회복은 매우 불균질한 양상으로 나타났으며, 지하수위 변화에 영향을 미치는 주요 요인 또한 위치별로 달랐다. 지하수위 상승으로 인해 침투(seepage), 액상화(sand liquefaction), 토양다짐(loess hydro-compaction) 등의 지질재해가 우려되는 지역도 확인되었다. MacAllister et al.(2022)은 현재 과다 양수로 인해 지하수 하강 문제를 겪고 있는 파키스탄 및 인도 북서쪽 지역에서 20세기에는 지하수위 상승 문제가 있었음을 확인하였다. 20세기 초중반에 건설된 거대 관계 시스템(irrigation canal)에서 지하수로 함양되는 양이 증가하여 지하수위가 상승한 것으로 보이며, 이후 강수량이 적어지고, 지하수 개발량이 많아지면서 안정화되었다가 현재 수위 하강 패턴을 보이고 있는 것으로 해석하고 있다. Allocca et al.(2016)은 탈산업화 및 도시변화로 인해 지하수위가 상승하는 문제를 지적하고, 남부 이탈리아 나폴리에서 2013-2015년 지하수위 변화를 관찰하였다. 수위 상승 폭은 공간적으로 매우 불균질하게 관찰되었는데, 점토층에 의해 국부적으로 피압된 남서부 대수층에서 최대 2.05 m의 지하수 상승이 관찰되었다. Bob et al.(2016)은 사우디아라비아의 한 도시(Madinah)에서 상부 저투수층에 의해 피압되어 있는 대수층의 지하수위가 상승하는 것을 확인하였다. 수질 분석 결과, 인위적 오염원의 영향은 없는 것으로 판단되며, 지하수위 상승은 대형 지하 구조물(예: 지하공원)에 의해 지하수 흐름이 차단되어 나타나는 현상으로 설명하였다. Yihdego et al.(2017)에 따르면, 토지이용의 변화(예: 도로, 묘지)로 인해 지하수 함양과 함께 배수채출 현상이 영향을 받을 수 있고, 대수층의 저류계수가 감소할 수 있다. 이외에도 Duan et al.(2019)은 중국 옌안 신도시에서 산을 깎고 골짜기를 황토로 메워 토지를 평탄화한 후 지하수위가 상승한 것을 확인하였다. 특히, 100 m 깊이로 메꾼 골짜기 하류에서 지하수위가 눈에 띄게 상승하였다(12.6 cm/month ~ 26.7 cm/month). 선행연구사례를 고려할 때, Well B 주변으로 지하수위를 상승시키는 외부력을 진단하는 연구 이외에도, 지하수위 상승을 외부력으로 보고 주변 지질환경 시스템의 리질리언스를 평가하여 지하수위 상승으로 인한 피해를 예방할

필요가 있는 것으로 판단된다.

3.2.2. 관측정 C

관측정 C의 지하수위는 관측이 시작된 해(2005년)를 제외하면 큰 변화 없이 비교적 안정적이다. 그러나 EC의 경우, 큰 변화를 보이는데, 특히 2004년 착공 직후 높은 EC가 관찰되고, 이후 꾸준히 감소하였다. 비록 월별 자료 및 더 많은 관찰 변수와의 상관분석을 통해 확인할 필요가 있었으나, 2005년에 관찰된 높은 EC는 관정 설치에 따른 해수 침투의 영향일 것으로 판단된다(Fig. 8). Shin and Hwang(2020)에 따르면, 해안가에서 관정을 시추할 경우, 자연 상태의 수리 시스템이 붕괴되어 담수와 염수 간의 밀도 차이로 인해 관정을 통해 해수가 유입될 수 있다. Shin and Hwang(2020)은 제주 해안 대수층에서 해수 유입을 차단해 주는 흐름을 확인하였으나, 연구지역의 관측정 C 주변에는 그런 흐름이 없어 관측정 설치와 함께 해수가 유입된 것으로 보인다. 즉, 관측정 C는 해수 침투에 매우 취약한(흡수력 또는 내구성이 낮은) 대수층에 설치되었음을 유추할 수 있다.

초기 EC(자연상태의 EC; *TSP*)를 알 수 없으나, 2011-2015년에 관찰되는 최저 EC를 이 지역 지하수의 자연상태로 가정한다면, 이 지점은 관측정 설치 이전부터 해수의 영향을 받고 있었던 것으로 보인다. 2005년에 높은 EC가 관측된 이후, EC는 지속적으로 감소하는데, 이러한 감소 경향은 지하수 시스템의 자연회복력(적응력)을 지시할 수 있다. 2005-2020년 자료를 이용할 경우, -1,062 $\mu\text{S}/\text{cm}/\text{yr}$ 의 감소 속도를 보였다. 2008년까지의 자연회복 속도보다 2008년 이후의 자연회복 속도가 훨씬 빨랐던 것으로 보인다.

2015년 이후 EC는 점차 증가하여, 2019년 작은 피크(11,395 $\mu\text{S}/\text{cm}$)를 보인다. 이 시기에 Cl도 함께 증가하는 것을 고려할 때(Fig. 10), 해수의 영향이 커진 것으로 판단된다. 특히, 2016년 상반기(5월, 1,958 mg/L)와 달리, 하반기(11월)에 높은 Cl(6,853.3 mg/L)이 관찰되었는데, 이 화학분석 결과에서도 2016년 11월 매우 높은 농도의 Cl(6,382.2 mg/L)이 조사되었다. 이에 대한 원인(하구로 유입되는 방류량, 양수 등의 영향)을 분석할 필요가 있다. 같은 기간 동안 연평균 수위에는 변화가 관찰되지 않았다.

Won et al.(2015)은 염수로 충전된 부산시 낙동강 델타 지역에 염수오염을 방지하고 지하수 자원을 확보할 수 있는 인공함양 실증시설을 구축할 목적으로, 점토층(두께 10~21 m)에 의해 피압되어 있는 주대수층(하부모래층 31.5~36.5 m 두께와 자갈층 2.8~11 m 두께로 구성)에 담

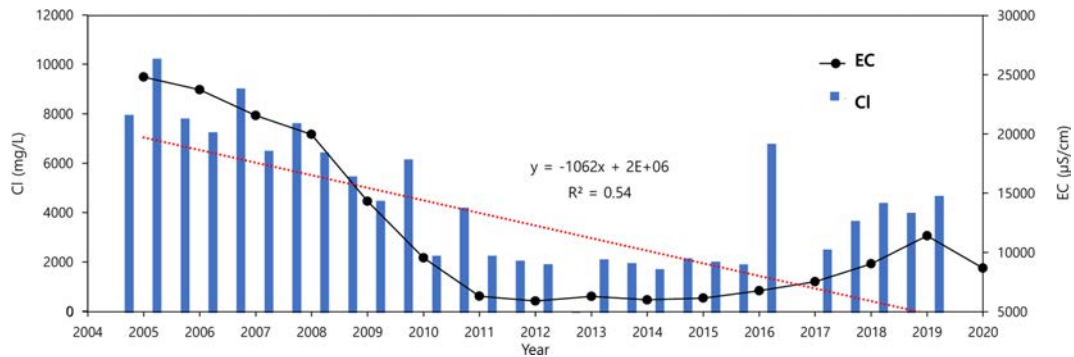


Fig. 10. Temporal variation of EC and Cl at Well C. The Cl concentrations were from the water quality data analyzed twice a year. The red dotted line is linear regression using the EC data in 2005-2020.

수 주입시험을 실시하였다. 시간의 경과에 따라 담수체가 축소되었는데, 염수와 담수의 밀도 차이뿐만 아니라, 연구 지역이 피압대수층이며 사방이 불투수층에 의하여 차단되어 있어서 염수가 이동할 공간이 제한되어 있기 때문인 것으로 판단하였다.

3.2.3. 관측정 E

관측정 E의 지하수위는 증감을 반복하며 2008년 이후 전반적으로 상승하는 경향을 보이고 있다. 수위 변화가 강수량의 변화와 높은 상관성을 가지고 있는 것으로 보아 (Fig. 6), 지하수위가 강수량의 변화에 민감하게 반응하는 관정으로 판단된다.

EC도 수위와 유사한 변화 패턴을 보인다(Fig. 7). 관측정 E의 수질이 해수의 영향을 보이지 않는 것을 고려할 때(Fig. 8), 강수 시 오염물질이 유입되는 관정으로 볼 수 있다.

3.3. 리질리언스의 정량적 비교

앞서 언급한 외부력 중 강수량의 변화(기후변화)는 연구지역 내 모든 관정에 영향을 미쳤다고 볼 수 있다. 따라서 강수량의 변화를 외부력으로 보고, 관측정 E와 F의 리질리언스를 비교해 보았다. 이 연구에서는 외부자원 투입의 영향, 즉 복구력은 평가에서 제외하였으므로, 식 (1) 대신 식 (2)를 활용하였다.

$$RC = \frac{SI}{TSP} = \frac{\int_{2005}^{2020} |TSP - SP| dt}{TSP} \quad (2)$$

여기서 SP 는 연평균 수위를 활용하였으며, 관정별 목표치 (TSP)는 관측기간 중 관찰된 가장 높은 수위로 임의로 택하였다. 평가 기간은 관측 자료가 모두 존재하는 2005-

2020년으로 하였다. 관측정 B와 C의 경우, 기후변화 이외에도 토지이용 변화, 해수침투 등 다른 외부력의 영향을 크게 받는 것으로 판단되어 RC 평가에서 제외하였다. 관측정 A의 경우, TSP 로 활용될 최고 수위가 크게 다르고 (Fig. 6), 관측정 D의 경우, 2019-2020년 자료가 없어 RC 평가에서 제외하였다.

평가 결과, 관측정 E가 더 큰 RC 를 보여 기후변화와 관련하여 리질리언스 확보가 필요한 관정으로 확인되었다 (Table 3). 관측정 F의 지하수위는 비교적 일정한 패턴을 보이고 있어 (Fig. 6), 어떠한 외부력에도 리질리언스한(변화가 적거나 변화하더라도 빠르게 회복하는) 것으로 평가된 바 있는데, RC 가 이를 정량적으로 확인해 준 것으로 판단된다.

비록 관측정 F의 암반지하수(F-b)와 충적지하수(F-a)는 모두 비교적 일정한 지하수위를 보여주나 (Fig. 6), 암반지하수(F-b)가 충적지하수(F-a)보다 더 낮은 RC 를 보여, 강수량 변화에 대하여 상대적으로 더 리질리언스한 것으로 나타났다. 이외에도 암반지하수(F-b)에서는 비교적 높은 EC가 일정하게 관찰되나($426 \pm 35 \mu S/cm$), 충적지하수(F-a)에서는 EC가 눈에 띄는 증감을 보이고 있다($325 \pm 48 \mu S/cm$). 이들 EC 변화를 이용하여 지표오염물질에 대한 두 관측정의 리질리언스를 비교해 보았다(Table 3). 식 (2)에서 SP 는 연평균 EC를 활용하고, 관정별 목표치(TSP)는 관측기간 중 관찰된 가장 낮은 EC를 임의로 택한 결과, 암반지하수의 RC 가 더 낮아 지표오염물질에 더 리질리언스한 것으로 평가되었다. 일반적으로 천부의 충적대수층이 심부의 암반대수층에 비해 지표 현상(예: 강수량 변화, 지표 오염)에 더 민감한데, RC 가 이를 정량적으로 확인해 준 것을 알 수 있다. RC 는 지하수 관정 주변 대수층의 리질리언스를 정량적으로 평가하는데 유용한 방법인 것으로 판단된다.

Table 3. Resilience cost (RC) of groundwater wells to external forces

Well	External forces		
	Changes in annual precipitation		Contamination
Well E	0.33		-
Well F-b	0.05		4.4
Well F-a	0.06		5.8

4. 결 론

지하수 리질리언스의 정량적 평가 사례를 구축하기 위해 낙동강 조간대 국가지하수관리측정망의 지하수위 및 EC 변화를 살펴보았다. 그 결과, 관측정마다 수위와 EC의 변화 양상이 서로 달랐으며, 수질 및 수위 변화에 영향을 미치는 주요 요인(외부력)이 상이해 보였다. 낙동강 조간대의 경우, 도시개발이 활발하고, 해수 및 강수에 의해서도 지하수위 또는 EC가 변화할 수 있는 지역이다. 따라서 연구지역의 토지이용, 지질정보, 개발이력, 및 지형변화 이력을 구축하여 변화 원인(외부력)을 해석하고, 외부력에 의한 영향 및 자연적인 회복 속도를 평가해 보았다. 연구 결과, 관측정 C에서는 관정 굴착과 함께 해수 유입이 일어나고 이후 자연회복(담수화; 회복 속도 $-1,062 \mu\text{S/cm/yr}$)되는 것으로 판단되며, 관측정 E는 다른 관측정들과 달리 강수에 크게 영향을 받는 것으로 보인다. 이외에도 관측정 B는 연구지역이 지하수위 상승으로 인한 지질재해도 발생할 수 있는 지역임을 지시하였다. 한편, 관측정 A와 F의 경우, 어떠한 외부력에도 리질리언스가 확보된 관정으로 판단된다.

강수량의 변화가 연구지역 내 관측정에 동일하게 영향을 미친다는 것을 고려하여, 강수량의 변화를 외부력으로 보고, 관측정 E와 F의 리질리언스 비용(RC)을 평가한 후 관정 주변 대수층의 리질리언스를 비교해 보았다. 모니터링을 목적으로 운영되는 국가지하수관리측정망의 특성상, 복구력은 고려하지 않았다. RC 평가 결과에 따르면, 강수량의 변화에 민감하게 반응하는 관측정 E의 RC가 관측정 F에 비해 크게 평가되어, 리질리언스 확보가 필요한 관정임을 확인할 수 있었다. 한편, 관측정 F의 암반지하수가 관측정 F의 층적지하수보다 기후변화 및 지표오염에 더 리질리언스한 관정으로 평가되었는데, 이는 RC가 리질리언스 평가에 유용한 지표로 활용될 수 있음을 시사한다. 추후 월별 자료 분석 및 교차 상관분석 등을 통해 Well E 주변 대수층이 기후변화에 대하여 낮은 리질리언스를 보이는 이유를 평가하고 리질리언스 확보 방안을 마련할 필요가 있다. 이외에도 연구지역의 지하수는 보 개방, 낙동강의 수위 변화, 농업 활동 등의 영향을 받을 수

있다는 것을 고려할 때, 이들 외부력에 대한 리질리언스도 평가해 볼 필요가 있다.

리질리언스 평가 과정에서 다음과 같은 어려움이 확인되었다. (1) 관정마다 서로 다른 외부력에 의해 복합적으로 영향을 받기 때문에, 관정을 통해 얻어지는 점(point) 정보를 이용하여 지하수 환경(대수층)의 리질리언스를 평가하는 데는 한계가 있다. 특히 대수층의 특성을 대표하는 관정을 선정하는 데 전문가의 판단이 요구되며, 관정별 외부력을 구분하는 데도 어려움이 있다. (2) 국가지하수관리측정망 자료를 활용할 경우, 장기적 변화를 살펴볼 수 있으나, 복구력을 고려할 수 없다는 단점이 있다. (3) TSP 선정의 어려움이 있다. 수질의 경우, 배경수질이나 수질기준을 활용할 수 있으나, 수위의 경우, 목표 수위를 평가해야 하는 어려움이 있다.

이러한 어려움에도 불구하고 대체 수자원 확보 및 지하 환경 보전을 위해 지하수 리질리언스를 평가할 필요가 있다. 특히 지하수 리질리언스의 정량적 평가는 지하수 시스템에 대한 이해를 돕고 리질리언스를 확보하는 데 기여할 수 있다. 이외에도 지하수 리질리언스의 정량적 평가 기술은 토양과 같은 다른 지질환경의 리질리언스 또는 지질재해(지진, 산사태 등의 외부력)에 대한 국가 리질리언스를 평가하는데도 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 기후변화위기에 대응하여 수자원 시스템의 리질리언스를 확보하는 데 있어 지하수 자원을 활용하는 방안을 마련하는 데도 도움이 될 수 있다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업(23-3411 및 23-3415)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Allocca, V., Coda, S., De Vita, P., Iorio, A., and Viola, R., 2016, Rising groundwater levels and impacts in urban and semirural areas around Naples (southern Italy), *Soc. Geol. It.*, **41**, 14-17.
- Anderson, D.J., 2017, Coastal groundwater and climate change,

WRL Technical Report 2017/04.

Becker, B., Reichel, F., Bachmann, D., and Schinke, R., 2022, High groundwater levels: Processes, consequences, and management. *WIREs Water*, **9**(5), e1605.

Béné, C., Mehta, L., McGranahan, G., Cannon, T., Gupte, J., and Tanner, T., 2018, Resilience as a policy narrative: potentials and limits in the context of urban planning, *Climate and Development*, **10**(2), 116-133.

Bergh, E.W. and Compton, J.S., 2015, A one-year post-fire record of macronutrient cycling in a mountain sandstone fynbos ecosystem, South Africa, *South African Journal of Botany*, **97**, 48-58.

Blanco-Canqui H. and Lal R., 2010, Soil resilience and conservation. In: Principles of soil conservation and management. Springer, Dordrecht.

Bob, M., Rahman, N., Elamin, A., and Taher, S., 2016, Rising groundwater levels problem in urban areas: A case study from the central area of Madinah City, Saudi Arabia, *Arab J Sci Eng*, **41**, 1461-1472.

Bonetti, J. de A., Anghinoni, I., de Moraes, M.T., and Fink, J.R., 2017, Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems, *Soil & Tillage Research*, **174**, 104-112.

Busan Metropolitan City, 2015, Summary report on the 12th ecological monitoring in the Nakdong River Estuary

Calow, R.C., MacDonald, A.M., Nicol, A.L., and Robins, N.S., 2010, Ground water security and drought in Africa: Linking availability, access, and demand, *Ground Water*, **48**(2), 246-256.

Chung, S.G., Baek, S.H., Ryu, C.K., and Kim, S.W., 2003, Geotechnical characterizaation of Pusan clays, *2003 ISSMGE ATC-7* p.1-42.

Chung, S.-G., Jang, W.-Y., Ninjarav, E., and Ryu, C., 2006, Compressibility characteristics associated with depositional environment of Pusan clay in the Nakdong River Estuary, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, **22**(12), 57-65.

Chung, S.Y., Rajendran, R., Senapathi, V., Sekar, S., Rangathan, P.C., Oh, Y.Y., and Elzain, H.E., 2020, Processes and characteristics of hydrogeochemical variations between unconfined and confined aquifer systems: a case study of the Nakdong River Basin in Busan City, Korea, *Environmental Science and Pollution Research*, **27**, 10087-10102.

Cuthbert et al., 2019, Observed controls on resilience of groundwater to climate variability in sub-Saharan Africa, *Nature*, **572**, 230-234.

Cutter, S.L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., and Webb, J., 2008, A place-based model for understanding community resilience to natural disasters, *Global Environmen-*

tal Change, **18**(4), 598-606.

Deloitte, 2019, Business continuity & resilience, *UC Ethics, Compliance and Audit Symposium*, October 2019. https://www.ucop.edu/ethics-compliance-audit-services/_files/2019_symposium_presentations/bk2-2-disaster-defrain.pdf [accessed 23.06.22]

Duan, X., Dong, Q., Ye, W.-J., Zhou, J.-L., and Oh, E., 2019, Study on adverse effects of groundwater level rising induced by land creation engineering in hilly and gully area of the Loess Plateau, *J. Mt. Sci.*, **16**(12), 2739-2753.

Emhanna, S.A., Musa, N.S.B., and Mostafa, M.F., 2021, Causes and impacts of rising water table in Ajdabiya City, NE Libya, *International Journal of Environment & Water*, **10**(2), 127-140.

Foster, S., Eichholz, M., Nlend, B., and Gathu, J., 2020, Securing the critical role of groundwater for the resilient water-supply of urban Africa, *Water Policy*, **22**(1), 121-132.

Franco, I., Contin, M., Bragato, G., and De Nobili, M., 2004, Microbiological resilience of soils contaminated with crude oil, *Geoderma*, **121**, 17-30.

Godschalk, D.R., 2003, Urban hazard mitigation: creating resilient cities, *Nat. Hazards Rev.*, **4**(3), 136-43.

Greenland, D. and Szabolcs, I., 1994, Soil Resilience and sustainable land use, CABI.

Holling, C.S., 1973, Resilience and stability of ecological systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, **4**, 1-23.

Jiao, S., Chen, W., and Wei, G., 2019, Resilience and assemblage of soil microbiome in response to chemical contamination combined with plant growth, *Appl Environ Microbiol*, **85**(6), e02523-18.

Jo, W.R., 1997, The Geomorphic analysis of the Yangsan Fault area, *Journal of the Korean Geographical Society*, **32**(1), 1-14.

Kang, S., Lee, Y.G., Bae, B.Y., Lee, J.W., and Yoon, S., 2000, The Holocene environmental change of the estuary of Nagdong River, Southern Korea, *Laguna*, **7**, 15-21.

Kharroubi, A., Farhat, S., Agoubi, B., and Lakhbir, Z., 2014, Assessment of water qualities and evidence of seawater intrusion in a deep confined aquifer: case of the coastal Djefara aquifer (Southern Tunisia), *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, **63**(1), 76-84.

KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2021, 1:25 Busan quaternary map and explanatory note, p154.

Kim, H.-T., Kim, K., Ryu, S.-H., and Lee, I.-C., 2015, A study on physical characteristic of ground water and sediment property in intertidal flat of Nakdong River Estuary, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, **21**(5), 467-473.

- Kim, M.S., Min, H.G., Hyun, S.H., and Kim, J.G., 2020a, Soil resilience and threat factors related to agricultural environment, *Ecology and Resilient Infrastructure*, **7**(1), 26-42.
- Kim, M.S., Min, H.G., Hyun, S.H., and Kim, J.G., 2020b, Evaluation methods of soil resilience related to agricultural environment, *Ecology and Resilient Infrastructure*, **7**(2), 97-113.
- Kim, S.H., 2005 The morphological changes of deltaic barrier islands in the Nakdong River Estuary after the construction of river barrage, *Journal of the Korean Geographical Society*, **40**(4), 416-427.
- Kim, S.W., Kim, I.S., Choi, E.K., and Chung, S.G., 2002a, The properties of Pusan clay: Magnetic susceptibility of deltaic sediments, *Proceedings of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment Conference*, Busan National University, Busan, 2002.9.13.-14, p.315-318.
- Kim, S.W., Lee, H.J., Won, J.H., Ryu, C.K. and Chung, S.G., 2002b, The properties of Pusan clay: Electrical resistivity of deltaic sediments, *Proceedings of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment Conference*, University of Seoul, Seoul, 2002.4.12.-13, p.295-298.
- Kim, S.-W., Lee, S.-W., Lee, J.-W., Jo, K.-Y., Kim, Y.-T., and Kim, J.-S., 2006a, Depositional environments and sequence stratigraphy of estuary of the Nakdong River, *KGS Spring Conference*, March 24-25, Seoul, 882-887.
- Kim, S.-W., Choi, E.-K., and Lee, K.-H., 2011, Sequence stratigraphy of unconsolidated sediments in estuary of the Nakdong River, *Joint Symposium of ATC 7 & Korean Geotechnical Society*, November 25, 2011, Busan, 173-180.
- Kim, T.-H., Yu, J.-M., Lee, M.-J., Bae, K.-H., and Jeong, D.-S., 2006b, A design case study considering the artesian pressure in Hwa Jean site of Nakdong delta area, *Korean Association of Professional Engineers Soil Mechanics & Foundation Engineering*, 311-319.
- Linstadter, A., Kuhn, A., Naumann, C., Rasch, S., Sandhage-Hofmann, A., Amelung, W., Jordaan, J., Du Preez, C.C., and Bollig, M., 2016, Assessing the resilience of a real-world social-ecological system: lessons from a multidisciplinary evaluation of a South African pastoral system, *Ecology and Society*, **21**(3), 35.
- MacAllister, D.J., Krishan, G., Basharat, M., Cuba, D., and MacDonald A.M., 2022, A century of groundwater accumulation in Pakistan and northwest India, *Nature Geoscience*, **15**, 390-396.
- MacDonald, A.M., Bonsor, H.C., Calow, R.C., Taylor, R.G., Lapworth, D.J., Maurice, L., Tucker, J., and Ó Dochartaigh, B.É., 2011, Groundwater resilience to climate change in Africa. British Geological Survey Open Report, OR/11/031. 25 pp.
- Maurice, L., Taylor, R., MacDonald, A., Sanga, H., Johnson, P., Darling, G., and Goody, D., 2010, Case study note: Resilience of intensive groundwater abstraction from weathered crystalline rock aquifer systems to climate change in sub-Saharan Africa, Groundwater Programm Internal Report IR/10/105. British Geological Survey.
- Mtoni, Y., Mjemah, I.C., Bakundukize, C., Camp, M.V., Martens, K., and Walraevens, K., 2013, Saltwater intrusion and nitrate pollution in the coastal aquifer of Dar es Salaam, Tanzania, *Environ Earth Sci*, **70**, 1091-1111.
- Park, J., Yoon, H.-S., and Jeon, Y.-H., 2016, Spatial characteristics of vegetation development and groundwater level in sand dunes on a natural beach, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, **19**(3), 218-226.
- Park, S.C., 1992, Seismic characteristics and depositional process of sediments in Jinhae Bay, Southeast Coast of Korea. Master's thesis, Chungnam National University.
- Patel, V., Sharma, A., Lai, R., Al-Dhabi, N.A., and Madamwar, D., 2016, Response and resilience of soil microbial communities inhabiting in edible oil stress/contamination from industrial estates, *BMC Microbiol*, **16**(50).
- Seybold, C.A., Herrick, J.E., and Brejda, J.J., 1999, Soil resilience: a fundamental component of soil quality, *Soil Science*, **164**(4), 224-234.
- Shin, J. and Hwang, S., 2020, A Borehole-based approach for seawater intrusion in heterogeneous coastal aquifers, Eastern Part of Jeju Island, Korea, *Water*, **12**(2), 609.
- Shrestha, S., Neupane, S., Mohanasundaram, S., and Pandey, V.P., 2020, Mapping groundwater resiliency under climate change scenarios: A case study of Kathmandu Valley, Nepal. *Environmental Research*, **183**, 109149.
- Vugrin, E.D., Warren, D.E., and Ehlen, M.A., 2011, A resilience assessment framework for infrastructure and economic systems: Quantitative and qualitative resilience analysis of petrochemical supply chains to a hurricane, *Process Safety Progress*, **30**(3), 280-290.
- Vugrin, E.D., Warren, D.E., Ehlen, M.A., Camphouse, R. C., 2010, A framework for assessing the resilience of infrastructure and economic systems. In Gopalakrishnan, K. and Peeta, S. (ed.) Sustainable and resilient critical infrastructure systems: Simulation, modeling, and intelligent engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 77-116.
- Won, K.-S., Chung, S.Y., Lee, C.-S., and Jeong, J.-H., 2015, Replacement of saline water through injecting fresh water into a confined saline aquifer at the Nakdong River delta area, *The Journal of Engineering Geology*, **25**(2), 215-225.
- Yao, Y., Zhang, M., Deng, Y., Dong, Y., Wu, X., and Kuang, X., 2021, Evaluation of environmental engineering geology issues caused by rising groundwater levels in Xi'an, China, *Engineer-*

ing Geology, **294**, 106350.

Yihdego, Y., Danis, C., and Paffard, A., 2017, Why is the groundwater level rising? A case study using HARTT to simulate groundwater level dynamic, *Water Environ Res*, **89**(12), 2142-2152.

Yoon, S.C, Youn, S.H., and Suh, Y.S., 2017, The characteristics of spatio-temporal distribution on environmental factors after construction of artificial structure in the Nakdong River Estuary, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energ*, **20**(1), 1-11.

Yu, S., Kim, S.-W., Oh, C.-W., An, H., Kim, J.-M., 2015, Quantitative assessment of disaster resilience: An empirical study on

the importance of post-disaster recovery costs. *Reliability Engineering and System Safety* **137**, 6-17.

Yu, S., Yoon, S.-M., Choi, E.-K., Kim, S.-D., Lee, Y.-J., Lee, Y., and Choi, K.-H., 2016, Quantitative assessment of national resilience: A case study of Mount Paektu eruption scenarios on South Korea, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **19**, 118-132.

Yu, S., Kim, H.-R., Yun, S.-T., Ryu, D.-W., and Yum, B.-W., 2021, Suggestion of quantitative assessment of groundwater resilience, *J. Soil Groundwater Environ*, **26**(5), 60-76.