

지하수 리질리언스의 정량적 평가 방안

유순영¹ · 김호림^{2*} · 윤성택³ · 류동우² · 염병우²

¹고려대학교 스마트지중환경관리연구단

²한국지질자원연구원

³고려대학교 지구환경과학과

Suggestion of Quantitative Assessment of Groundwater Resilience

Soonyoung Yu¹ · Ho-Rim Kim^{2*} · Seong-Taek Yun³ · Dong-Woo Ryu² · Byoung-Woo Yum²

¹Smart Subsurface Environment Management (Smart-SEM) Research Center, Korea University, Seoul 02841, Korea

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 34132, Korea

³Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 02841, Korea

ABSTRACT

The concept of resilience seems applicable for sustainable groundwater management. The resilience is broadly defined as the ability of a system to resist changes by external forces (EFs), and has been used for disaster management and climate change adaptation, including the groundwater resilience to climate change in countries where groundwater is a major water resource, whereas not yet in the geological society of South Korea. The resilience is qualitatively assessed using the absorptive, adaptive, and restorative capacity representing the internal robustness, self-organization, and external recovery resources, respectively, while quantitatively using the system impact (*SI*) and recovery effort (*RE*). When the groundwater is considered a complicated system where physicochemical, biological, and geological components interact, the groundwater resilience can be defined as the ability of groundwater to maintain the targeted quality and quantity at any EFs. For the quantitative assessment, however, the resilience should be specified to an EF and measurable parameters should be available for *SI* and *RE*. This study focused on groundwater resilience to two EFs in urban areas, i.e., pollution due to land use change and groundwater withdrawal for underground structures. The resilience to each EF was assessed using qualitative components, while measurements for *SI* and *RE* were discussed.

Key words : Groundwater, Resilience, External forces, System impact, Recovery effort

1. 서 론

좁은 국토에 많은 인구가 도시를 중심으로 밀집하여 살고 있는 우리나라에서 지하수 토양 환경은 잘 보전되어

야 한다. 토양은 우리 삶의 터전이자 식량안보를 책임질 수 있는 근간이며, 지하수는 물순환 과정에서 중요한 역할을 할 뿐만 아니라 비상시 수자원으로도 활용되어야 하기 때문이다. 또한, 대기 또는 지표수 환경에 비하여, 지하수 토양 환경은 지하환경정보의 불확실성 및 불균질성으로 인하여 훼손되더라도 인지하기가 어려우며, 복원하는데 오랜 시간이 소요되기 때문에 훼손되지 않도록 보전하는 것이 중요하다. 이와 함께, 최근 물관리 정책의 패러다임이 유역 규모에서 수량과 수질을 통합 관리하는 방향으로 전환되면서 지하수 환경 보전에 대한 중요성이 부각되고 있다. 이와 같은 국내 상황을 고려할 때, 사후 대응의 관점에서 벗어나 사전 예방 차원에서 지하수 환경을 보전하기 위해 재난재해 관리에 사용되고 있는 리질리언스(resilience) 개념을 지하수 환경 관리에 도입할 필요가 있다.

주저자: 유순영, 고려대학교 스마트지중환경관리연구단, 연구교수
공저자: 윤성택, 고려대학교 지구환경과학과, 교수
공저자: 류동우, 한국지질자원연구원 Geo-ICT 융합연구팀, 책임 연구원

공저자: 염병우, 한국지질자원연구원 CO2 지중저장연구단, 책임 연구원

*교신저자: 김호림, 한국지질자원연구원 Geo-ICT 융합연구팀, 선임연구원

Email: honeius@kigam.re.kr

Received : 2021.10.07 Reviewed : 2021.10.13

Accepted : 2021.10.25 Discussion until : 2021. 12. 31

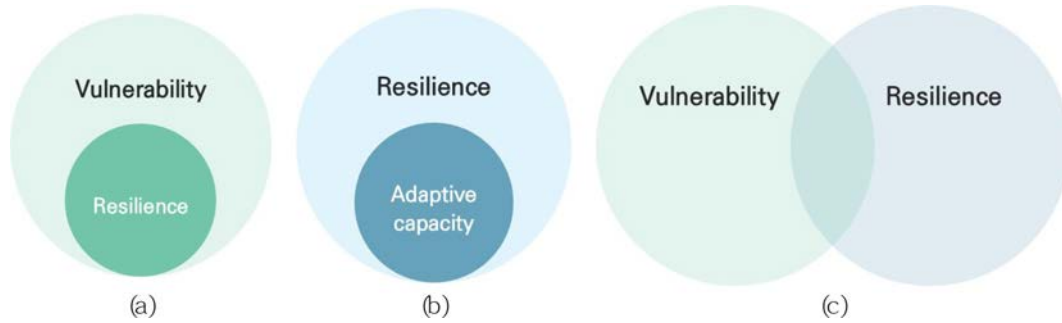


Fig. 1. Relationship between vulnerability, resilience, and adaptive capacity in hazard research (after Cutter et al., 2008). In this study, resilience is defined as in (b) including the absorptive and restorative capacity as well as the adaptive capacity (see Table 1).



Fig. 2. Relationship between risk, vulnerability, and resilience (after Aamir, 2011). The risk is assessed using the probability and magnitude of external forces and consequences, while the consequences depend on the vulnerability of inventory to external forces. The resilience strategies include restoration strategies to reduce consequences as well as hardening strategies to reduce vulnerabilities.

리질리언스는 연구 그룹마다 다르게 정의될 뿐만 아니라, 취약성(vulnerability), 적응력(adaptive capacity) 등과도 혼동되어 사용되고 있다(Fig. 1; Cutter et al., 2008). 그러나 대체로 외부력(external force)에 의한 변화 압력에 저항하는 시스템의 능력을 의미하며, 기존의 취약성 평가와 달리 복구전략(restoration strategies)까지 고려한다(Fig. 2). 여기서 시스템이란 구성 요소들이 유기적으로 상호작용하는 집합체로서, 국가, 도시, 공동체일 수 있으며, 교통, 물자, 전력, 수자원, 에너지 공급 시설 등의 기반시설일 수도 있다. 외부력이란 재난재해(예: 지진), 기후변화, 도시화 등 시스템의 성능(system performance; *SP*)에 영향을 미치는 것을 일컫는다. 복구전략은 외부력에 의한 시스템 영향(system impact; *SI*)의 크기(즉, 피해 규모) 및

피해 기간을 줄이기 위해 시스템 내부에서 보이는 자력복구력(Table 1의 적응력)과 외부에서 투입되는 자원과 기술의 수준 및 신속한 조달능력(Table 1의 복구력(restorative capacity))을 일컫는다.

시스템 규모의 리질리언스는 생태학자 Holling(1973)에 의해 처음 정의된 이후, 재난재해의 관리 및 기후변화의 관점에서 활발히 연구되고 있다(Cutter et al., 2008). 토양 환경의 경우, 1990년대부터 농업 분야를 중심으로 토양 리질리언스가 연구되었다(Lal, 1997). 지하수 환경의 경우, 최근 물부족 국가를 중심으로 기후변화에 대한 수자원 리질리언스 관점에서 연구되고 있다(Maurice et al., 2010; MacDonald et al., 2011; 2015; Cuthbert et al., 2019). 특히, 영국의 지질조사소(British Geological Survey; BGS)는 지하수를 주요한 수자원으로 활용하는 아프리카 및 남아시아를 대상으로 지하수(수자원) 리질리언스 확보 방안을 연구하고 있는데, Gunderson(2000)가 언급한 ‘장기적 영향에 저항하는 능력’과 ‘회복하는데 소요되는 시간’의 2가지 리질리언스 특성을 지하수 자원에 적용하여 Table 2와 같이 2가지 시나리오를 대상으로 지하수 자원의 리질리언스를 연구하고 있다. 현재 전 세계적으로 지하수 리질리언스에 대한 관심이 높아져 2020년 국제학술지 Water는 특별호 ‘Groundwater Resilience to Climate Change and High Pressure’를 발간하였으며, International Water Resources Association(IWRA)은 2020년 10월 ‘Addressing Groundwater Resilience under Climate Change’를 주제로 학회를 개최하였다. 2022년에는 ‘Australasian Groundwater Conference 2022 – Science, Resilience & Adaptation’이 개최될 예정이다. 또한, BGS(2019)는 2019-2023년 연구추진전략으로 1) 탈탄소화 및 자원관리(decarbonisation and resource management), 2) 환경 변화, 적응 및 리질리언스(environmental change, adaptation and

Table 1. Components for the quantitative and qualitative assessment of groundwater resilience

| Related to the risk assessment (Fig. 2) | Quantitative Component for resilience (Fig. 4) | Qualitative Component for resilience | Method for enhancement | Example | |
|--|--|--------------------------------------|--|---------------------------|--|
| | | | | External force | Method for enhancement |
| Vulnerability Vulnerability & Consequence | System impact (<i>SI</i>) (Fig. 4a) | Absorptive capacity | Robustness of the groundwater system | Groundwater contamination | Strategies to reduce groundwater contamination vulnerability |
| | | | | Groundwater withdrawal | A large body of groundwater |
| | | Adaptive capacity | Natural recovery; emergency response plan | Groundwater contamination | Natural attenuation capacity (e.g., denitrifying bacteria) |
| | | | | Groundwater withdrawal | Natural aquifer recharge |
| Consequence | Recovery effort (<i>RE</i>) (Fig. 4b) | Restorative capacity | Amount of resources to recover the system; rapid delivery of resources | Groundwater contamination | Technology and resource for groundwater remediation; Social, economic, and policy & legislative environment (e.g., preference to enhanced remediation) |
| | | | | Groundwater withdrawal | Technology and resource for artificial aquifer recharge; Social, economic, and policy & legislative environment (e.g., public acceptance to artificial aquifer recharge) |

Table 2. Resilience of groundwater resources to two scenarios by British Geological Survey (BGS, 2021)

| Scenario | Resilience of groundwater resources |
|--|---|
| Long term (decadal) shifts in climate | dominated by the available groundwater storage given that larger groundwater bodies will be much less affected by long term shifts in climate than smaller bodies. |
| Short term (inter annual) climate shocks | dominated by the available groundwater storage, but also influenced by the long term average (decadal) recharge to the groundwater system because the recharge will help the system recover more quickly. |

resilience), 3) 복합재난과 리질리언스(multihazard and resilience)라는 세 가지 도전 목표를 제시하였는데, 지질 자원의 미래 핵심기술로서 리질리언스가 중요한 키워드로 등장하는 것을 알 수 있다.

국내에서는 2010년 무렵부터 재난재해 관리를 위해 리질리언스가 연구되기 시작하였고(NDMI, 2010), Yu et al.(2011)은 미래 자원환경지질 분야로서 국가기반시설 리질리언스 연구 동향을 분석한 바 있다. 이후 재난재해 분야를 포함한 다양한 분야에서 리질리언스 개념을 채택하여, 지역사회, 기반시설 또는 국가의 지속가능성을 도모하고 있으나(Lee et al., 2013; Kang et al., 2015; Park and Song, 2015; MOIS, 2017; Kwon, 2018), 여전히 리질리언스 연구는 많지 않은 편이며 리질리언스 평가의 어려움으로 인하여 정량적 평가 방법에 대한 연구는 더욱 찾아보기 힘들다. 토양 리질리언스의 경우, 최근 농업 분야에 소개되었다(Kim et al., 2020a; 2020b). 그러나 지하수 분야를 포함하여 지질자원 분야에서는 아직 리질리언스

개념을 연구한 바 없다.

지하수 환경이 불균질한 지하매질 내에서 다양한 물리적(예: 미고결입자, 공극, 단열, 불투수층), 화학적(예: pH, 용존산소, 반응성 광물질), 생물학적 구성 요소들(예: 탈질 미생물, 용존유기탄소)이 상호작용하는 시스템이라는 것을 고려할 때(Fig. 3), 지하수 환경 보전에도 리질리언스 개념을 적용하여 Table 1과 같이 흡수력(absorptive capacity), 적응력, 복구력으로 리질리언스 확보 방안을 평가하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 즉, 어떠한 외부력에도 수질적, 수량적 변화(시스템 영향(*SI*))가 적거나 영향을 받더라도 빠르게 회복되는 지하수 환경(시스템)을 유지하는 능력이 곧 지하수 환경의 리질리언스가 되며, 따라서 지속 가능한 지하수 자원 관리는 지하수 환경 리질리언스를 확보하는 방향으로 이루어질 필요가 있다. 외부력(예: 가뭄, 지하수 양수, 오염)의 변화 압력에도 불구하고 *SI*가 적은 시스템을 구축하는 것은 기존의 취약성 평가와 유사하나 빠르게 회복될 수 있는 능력까지 고려한다는 점에서 리질

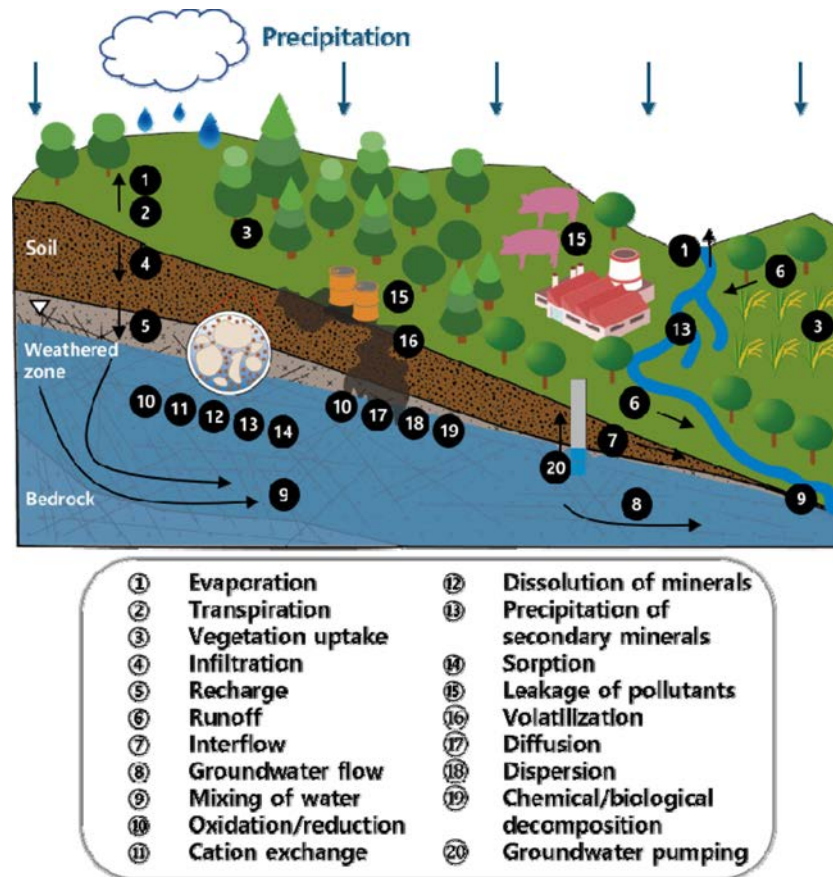


Fig. 3. Complex groundwater system due to the interaction among physical, chemical, and biological components in heterogeneous geologic media (modified after Appelo and Postma, 2005). Recently, anthropogenic activities (e.g., groundwater pumping and contaminant loading) make it more complicated.

리언스 확보는 취약성 관리보다 폭넓은 개념에 해당한다 (Fig. 2).

국내에서 지하수가 주요 수자원으로 사용되지는 않으나, 통합물관리를 비롯하여 지하수 환경 보전에 대한 관심이 높아지는 만큼 외부력에 대응하여 지하수 자원을 보전하기 위해 지하수 리질리언스 개념을 도입함이 필요하다. 이에 본 연구에서는 리질리언스 확보 노력에 대한 저변을 넓힌다는 의미에서 지하수 리질리언스의 개념을 정립하고 정량적 평가 방법을 검토해 보았다. 앞서 언급한 바와 같이 리질리언스는 시스템의 '능력'으로 정의하기 쉽지 않으며, 시스템의 다차원적인 특성으로 인하여 정량적 평가가 매우 어렵다. 따라서 지하수 리질리언스의 정량적 평가 방법을 고찰하기 위해서 지하수 시스템에 영향을 미치는 외부력을 살펴보고, 외부력 별로 지하수 리질리언스를 구체적으로 정의한 후 적절한 측정 방법을 검토하였다. 또한, 지하수 리질리언스에 영향을 미치는 내부적 및 외부

적 요소들을 흡수력, 적응력, 복구력의 관점에서 분류하여 보았다(Table 1). 국내 재난재해 관리 분야에서 흡수력은 내구성 또는 강건성으로, 적응력은 자력복구 또는 여분력과 대체성으로, 복구력은 신속성, 자원동원력, 지역경제력 등으로 언급되지만(NDMI, 2010), 이 연구에서는 Vulgrin et al.(2010b)의 흡수력, 적응력, 복구력의 용어를 사용하고, 특히 복구력을 리질리언스 평가의 주요한 특성으로 살펴보고 있다. 또한, 리질리언스는 회복력, 방재력 등 다양한 용어로 번역되다가, 최근 복원력이라는 단어로 널리 불리고 있으나, 본 연구에서는 리질리언스를 따로 번역하지 않고 그대로 사용하기로 하였다. 지하수 환경의 고유한 특성으로 인하여 추후 리질리언스가 달리 번역될 수도 있기 때문이다. 최근 국내 농업 분야에 토양 리질리언스의 개념과 측정 방법이 소개된 바 있는데(Kim et al., 2020a; 2020b), 이때도 리질리언스 용어를 그대로 사용하였다.

2. 리질리언스 개념과 연구동향

지하수 리질리언스 개념을 정립하기 위해 우선 시스템 규모의 리질리언스 연구 동향을 소개하고자 한다.

2.1. 시스템의 리질리언스

재난 연구자들 사이에서 리질리언스는 Fig. 1과 같이 사용되는데, 리질리언스를 결과적 현상에서 해석하는 관점(Fig. 1a)과 의사 결정 과정(Fig. 1b)으로 해석하는 관점에 따라 달리 정의할 수 있다. Fig. 1a에서 리질리언스는 재난에 대응하고 재난으로부터 회복될 수 있는 능력으로, 리질리언스는 취약성의 한 요소로 간주된다(Manyena, 2006). 반면, Fig. 1b는 리질리언스를 재난 관리 능력을 강화하려는 전반적인 과정으로 보고 적응력을 리질리언스의 한 요인으로 규정하는데, 대부분의 재난 연구자들은 이와 같은 시각으로 리질리언스를 연구하고 있다(Paton and Johnston, 2001; Paton and Johnston, 2006; Bruneau et al., 2003; Tierney and Bruneau, 2007). Fig. 1c는 취약성과 리질리언스를 분리하지만 필요에 따라 연결시키는 경우로서 Cutter et al.(2008)이 이와 같은 관점을 채택하였다.

본 연구에서는 리질리언스를 Fig. 1b의 관점으로 접근하며, 이 경우 리질리언스는 취약성과 달리 재해 이전에 구축된 내구성뿐만 아니라 재해 이후의 대응/복구 능력도 포함하게 된다(Fig. 2). 즉, Fig. 1b의 리질리언스는 Fig. 4와 같이 적응력 이외에도 흡수력과 복구력으로 평가될 수 있다(Vugrin et al., 2010b; Yu et al., 2015). 예를 들어, 평소 Y_N 의 시스템 성능(SP , 예: 지역 내 총생산)을 가지는 지역사회(시스템)에 지진과 같은 재난(외부력)이 닥치면, 지역사회는 변화(SI) 압력을 받게 된다. 그러나 일정 시간 동안은 영향력(SI)이 크게 나타나지 않는데, 이러한 능력을 그 시스템의 흡수력 또는 내구성이라고 한다(Table 1). 흡수력이 클수록 더 오랫동안 변화 압력에 견딜 수 있고 더 큰 외부력에도 변화를 보이지 않을 수 있다. US EPA의 지하수 오염 취약성 평가 기법인 DRASITC는 지하수 시스템에 대하여 이와 같은 내구성(흡수력)을 평가하는 방법이라고 할 수 있다(Aller et al., 1987).

Fig. 4a의 시나리오 1(빨간색)은 시스템 A(실선)가 t_1 까지 흡수력을 통해 외부력에 지탱한 결과를 보여준다(즉, Y_N 의 변화(SI) 없음). 그러나 외부력이 지속되면 시스템 영향(SI)이 나타나기 시작하는데, 시간 t_1 에서 시스템 A의 성능(SP)이 Y_{D1} 까지 떨어짐을 알 수 있다. 이때 시스템이 적응력(자력복구력)을 발휘할 수 있다면 외부 자원 없이

도 일정 부분 성능을 회복시킬 수 있다. Fig. 4a는 시간 t_2 에서 시스템 A가 Y_{D1} 까지 스스로 회복한 경우를 보여준다. 그러나 이 적응력마저 소진되면 시스템의 성능(SP)은 또 다시 떨어지고(시간 t_4), 이를 회복시키기 위해서는 외부자원이 투입되어야 한다(Fig. 4b). 한편, Fig. 4a의 시나리오 1(빨간색)에서 시스템 C(점선)는 외부력이 발생함과 동시에 SI 가 나타나고 있으며, 외부자원이 투입되기 전 스스로 회복되는 현상도 보이지 않는다. 즉, 흡수력과 적응력이 없는 경우에 해당한다. 이 시스템을 회복시키기 위해서는 외부자원이 투입되어야 하는데(Fig. 4b), 이때 복구력이 좋은 시스템의 경우에는 더 적은 복구자원으로도 더 빠르게 원 상태로 복구될 수 있다. 예를 들면, Fig. 4a의 시나리오 2(초록색)에서 시스템 A(실선)와 B(점선)는 동일한 SP 를 보이나, 복구과정에서 소용되는 복구자원의 양이 다르다(Fig. 4b). 시스템 A(초록색 실선)가 시스템 B(초록색 점선)보다 더 많은 복구자원을 필요로 했는데, 이 경우 시스템 B는 시스템 A보다 복구력이 더 큰 경우로서 시스템 A에 비하여 리질리언스를 더 갖춘 시스템으로 평가될 수 있다.

Fig. 4는 복구 전략이 시스템의 성능(SP)에 미치는 영향도 보여준다. 시스템 A에 대하여 시나리오 1은 t_5 에서 복구자원을 서서히 투입한 경우로(빨간색 실선), 복구가 완료되기 이전 두 번째 재난이 닥칠 수 있고 두 번째 재난으로 인해 SP 가 급감하는 경우를 보여준다. 반면, 시나리오 3은 초기(t_3)에 복구자원을 투입하는 경우로(파란색 실선), 적은 복구 노력(RE)으로 SP 를 원래 상태로 회복시키는 경우이다. 그러나 두 번째 재난에 쉽게 영향을 받는다(Fig. 4a). 한편, 시나리오 2는 t_5 에서 복구자원이 대량 투입되어(초록색 실선) 시스템의 흡수력까지 강화시킨 경우로(예: 지진의 경우 내진보강), 두 번째 재난에 노출되어도 피해를 입지 않는 시스템을 만들 수 있음을 보여준다. 궁극적으로 시나리오 2와 같이 어떤 재난이 닥쳐도 목표 성능(targeted system performance; TSP)을 유지하는 시스템을 갖추는 것이 리질리언스를 확보한다는 의미가 된다.

2.2. 정량적 평가

리질리언스를 정량적으로 평가하기 위해서는 시스템의 성능(SP ; Fig. 4a의 Y에 해당)을 측정할 수 있어야 한다. 시스템(예: 지하수 또는 토양)마다 측정 가능한 Y가 다를 수 있고, 동일한 시스템에 대해서도 외부력(예: 지하수 오염 또는 유출 지하수)에 따라 측정해야 할 Y가 달라질 수 있다. Y가 결정되면 리질리언스를 측정할 수 있는데,

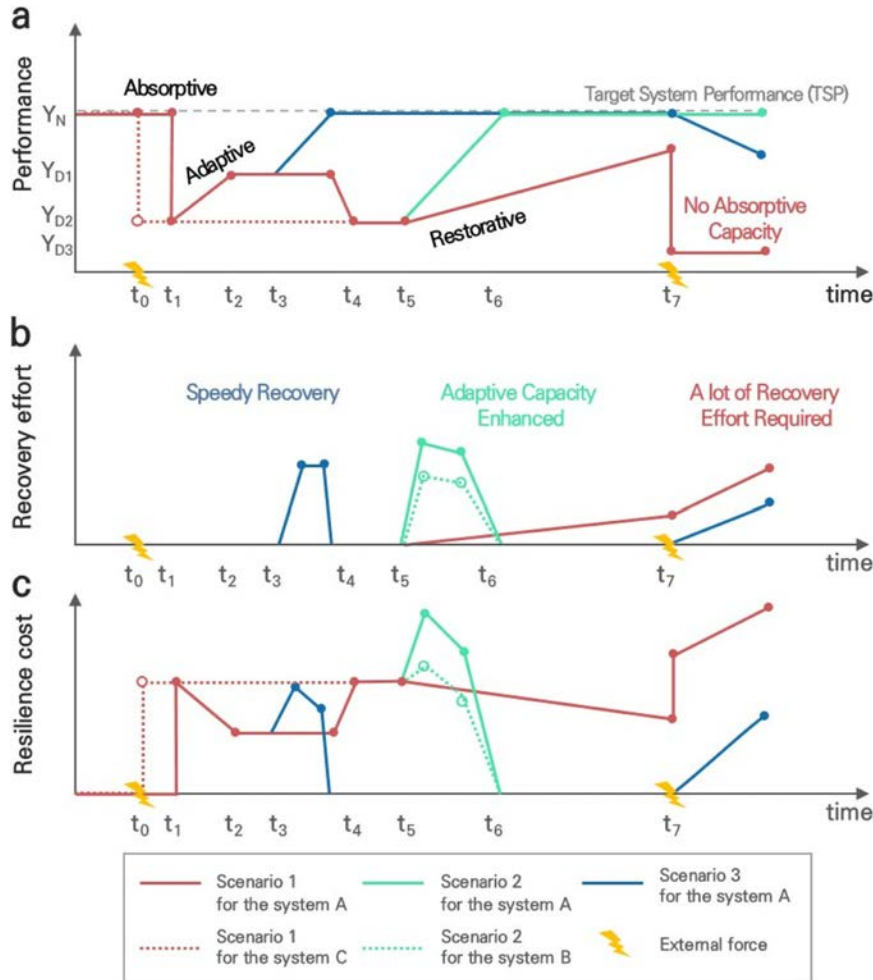


Fig. 4. Quantitative assessment of resilience using resilience cost (RC): (a) system impact (SI), (b) recovery effort, (c) RC which is the sum of SI and RE (modified after Yu et al., 2015). SI is the difference between targeted system performance (TSP) and system performance (SP). The magnitudes of SI and RE (thus RC) depend on the absorptive, adaptive, and restorative capacity of the system. The points indicate the measurement times, and the changes between measurements are assumed to be linear.

자주 사용되는 방법이 Table 3과 같다. Bruneau et al. (2003)은 기반시설의 상태 악화($Q(t)$)를 예측한 후 리질리언스 손실(Resilience Loss, RL)로 지진에 대한 지역사회 리질리언스를 측정하였는데, 최근에는 Im et al.(2020)이 Bisphenol A가 대수층의 리질리언스에 미치는 영향을 측정하기 위해 대수층의 RL 을 평가하였다. Chang과 Shinozuka (2004)은 미리 설정한 기준치(C)를 만족시킬 확률(Probability, P)로 리질리언스(Resilience, R)를 측정하였으며, 이와 유사하게 Lee et al.(2013)이 수자원 시스템의 회복도(resilience)를 용수부족이 발생한 이후 얼마나 빨리 정상상태로 복귀하는지의 확률로 평가하였다. Rose(2007)는 생산량의 변화율로 경제 리질리언스(Static resilience)를 측정하였는데, 이와 유사한 방법으로 최근 Shrestha et

al.(2020)은 네팔 카트만두 계곡에서 3가지 지하수 양수 시나리오($S1, S2, S3$) 및 2가지 기후변화 시나리오(RCP 4.5, RCP 8.5)에 대한 지하수 리질리언스($GwRe$)를 3개의 시간대(2031, 2061, 2091)에서 평가하였다. $GwRe$ 는 식 (1)과 같이 지하수 함양량(GwR)과 지하수위(GwL) 변화량의 비율로 평가되었다.

$$GwRe_{n+1} = \frac{GwR_{n+1}}{GwL_n - GwL_{n+1}} \times 100 \quad (1)$$

여기서 n 은 평가연도이다. $GwRe$ 의 경우, 값이 클수록 더 리질리언스가 확보된 경우를 나타낸다. Shrestha et al. (2020)은 $GwRe$ 값을 이용하여 지하수 리질리언스를 5개의 등급으로 나눈 뒤(Table 4), 이를 지도에 도식화하여 리질

Table 3. Quantitative assessment of resilience

| Researchers | Quantification | Variables |
|----------------------------|--|---|
| Bruneau et al. (2003) | $RL = \int_{t_0}^{t_f} [100 - Q(t)] dt$ | <i>RL</i> : Resilience Loss, <i>Q(t)</i> : degradation in the quality of community infrastructure, <i>t</i> ₀ : time of occurrence of an incident, <i>t_f</i> : time to full recovery |
| Chang and Shinozuka (2004) | $R = P(C i) = P(r_0 < r^* \text{ and } t_f < t^*)$ | <i>R</i> : Resilience, <i>P</i> : Probability, <i>t</i> : magnitude of an event, <i>C</i> : pre-defined performance standard, <i>r</i> ₀ : initial loss, <i>r</i> [*] : maximum acceptable loss, <i>t</i> : maximum acceptable disruption time |
| Rose (2007) | $\text{Static resilience} = \frac{\Delta DY^{\max} - \Delta DY}{\Delta DY^{\max}}$ $\text{Dynamic resilience} = \sum_{i=0}^n Y_{DR}(t_i) - \sum_{i=0}^m Y_{DU}(t_i)$ | <i>ΔDY</i> ^{max} : the maximum percent change in output, <i>ΔDY</i> : the actual percent change in output <i>n, m</i> : number of time steps considered, <i>t_i</i> : the <i>i</i> th time step, <i>Y_{DR}</i> : system output under hastened recovery efforts, <i>Y_{DU}</i> : system output without hastened recovery efforts |
| Vugrin et al. (2010b) | $RDR(RE) = \frac{\int_{t_0}^{t_f} TSP(t) - SP(t) dt + \alpha \int_{t_0}^{t_f} RE(t) }{\int_{t_0}^{t_f} TSP(t) dt}$ $OR = \min_{RE} \frac{\int_{t_0}^{t_f} TSP(t) - SP(t) dt + \alpha \int_{t_0}^{t_f} RE(t) }{\int_{t_0}^{t_f} TSP(t) dt}$ | <i>RDR</i> : Recovery Dependent Resilience Cost Index, <i>TSP</i> : Target System Performance, <i>SP</i> : System Performance, <i>RE</i> : Recovery Effort, <i>α</i> : Weighting factor <i>OR</i> : Optimal Resilience Cost Index |

Table 4. Groundwater Resilience based on *GwRe* in Eq. (1) (Shrestha et al., 2020)

| <i>GwRe</i> (%) | Resiliency Class | Interpretation |
|-----------------|-----------------------|--|
| 0 to 1 | Not resilient | Less groundwater recharge, higher reduction of groundwater level |
| 1 to 3 | Fairly resilient | Less groundwater recharge, fair reduction of groundwater level |
| 3 to 5 | Moderately resilient | Moderate groundwater recharge, moderate reduction of groundwater level |
| 5 to 8 | Highly resilient | Higher groundwater recharge, less reduction of groundwater level |
| > 8 | Very highly resilient | Higher groundwater recharge and very less reduction of groundwater level |

리언스의 지역 편차를 확인하였다.

위에 언급한 리질리언스 평가 방법들은 기존의 취약성 평가 방법과 달리, 복구활동 또는 복구시간을 고려하고 있다. 그러나 리질리언스를 정량화하는 과정에서 복구자원의 양은 포함하지 않았는데, 이를 보완한 것이 Vugrin et al.(2010b)에 의해 고안된 리질리언스 비용 지수(resilience cost index; *RCI*)이다. Vugrin et al.(2010b)은 외부력에 의해 떨어진 시스템 성능(*SP*)의 크기를 시스템 영향(*SI*; Fig. 4a)으로 평가하고, 이를 복구하기 위해 투입된 외부자원의 양을 복구노력(recover effort; *RE*; Fig. 4b)으로 평가하였다(Table 1). 그리고 시스템 영향(*SI*)과 피해 복구과정에서 소요된 복구자원의 규모(*RE*)를 합하여 리질리언스 비용(resilience cost; *RC*; Fig. 4c)이라 명명하였다.

$$RC = SI + \alpha RE \quad (2)$$

여기서 *α*는 단위 환산을 위한 계수로서 가중치로도 활용될 수 있다(Vulgrin et al., 2011). 리질리언스 비용(*RC*)은 외부력에 의해 시스템에 발생한 피해의 크기(*SI*)와 이를 복구(회복)하는데 사용되는 복구자원(*RC*)의 합으로, 규모(크기, *M*, 예: 지역총생산)가 서로 다른 시스템의 리질리언스를 비교하기 위해서는 시스템의 규모(*M*)로 나눈다. 이것이 곧 리질리언스 비용 지수(resilience cost index; *RCI*)로서 식(3)과 같다.

$$RCI = \frac{RC}{M} \quad (3)$$

식(1)의 *GwRe*과 달리(Table 4), *RCI*가 클수록 리질리언스가 낮은 시스템이 된다. 왜냐하면, 시스템의 규모(*M*)에 비하여 동일한 외부력에 대해 시스템의 영향(*SI*)이 크거나 복구자원(*RE*)을 많이 소요했기 때문이다. 즉, 앞서

Fig. 4의 시나리오 2에서 시스템 A(초록색 실선)는 시스템 B(초록색 점선)에 비하여 리질리언스가 더 낮은 경우였는데, 이를 정량적으로 설명하면, 시스템 A는 동일한 SI 에도 불구하고(Fig. 4a) 시스템 B보다 더 많은 RE 를 필요로 했으며(Fig. 4b) 따라서 더 큰 RC 를 초래하였다(Fig. 4c). 비록 시스템 규모(M)로 정규화하지 않은 상태이지만, RC 만으로도 시스템 A와 B의 리질리언스 차이를 구분할 수 있다. 만약 SI 만 고려했다면, 시나리오 2에서 시스템 A와 B는 리질리언스가 동일하다고 평가되었을 것이다. 또한, 시스템 A에 대하여 시나리오 2는 복구활동이 곧 예방의 효과를 가져온 경우로(초록색 실선), 복구비용(Fig. 4b)은 많이 소요되었으나 두 번의 재난에 대한 리질리언스 비용(Fig. 4c)은 시나리오 1(빨간색 실선)에 비해 적을 수 있음을 알 수 있다. 여기서 시나리오 1과 시나리오 2의 비교는 동일한 시스템 A에 대하여 비교하는 것으로서 M 으로 나누지 않고 RC 만으로도 비교 가능하다. 시나리오 3의 경우, t_3 과 t_4 사이에 SP 가 Y_{DI} 에서 Y_{π} 으로 회복되면서 외부력에 의한 SI 가 줄어들어 RC 가 감소하는 구간도 보여준다(Fig. 4c).

이와 같이 RCI 는 여타의 리질리언스 측정 방법과 비교하여, 외부력에 의한 시스템 영향(SI ; Fig. 4a)뿐만 아니라 복구 과정에서 소요되는 복구자원의 양(RE ; Fig. 4b)까지 고려한다는 특징이 있다. Table 3은 RCI 의 수학적 모형을 보여주는데, 여기서 SI , RE , M 은 각각 아래와 같다.

$$SI = \int_{t_0}^{t_f} |TSP(t) - SP(t)| dt \quad (4)$$

$$RE = \int_{t_0}^{t_f} |RE(t)| dt \quad (5)$$

$$M = \int_{t_0}^{t_f} |TSP(t)| dt$$

또한, Table 3은 특정 복구 활동을 계획대로 수행하는 RDR (recovery dependent resilience cost index)과 복구 과정에서 최적의 복구량을 계산하면서 복구자원을 투입하는 OR (optimal resilience cost index)의 2가지의 RCI 를 보여준다.

시스템 규모의 리질리언스를 평가하는데 있어 RCI 의 유용성은 널리 입증된 바 있다(Vugrin et al., 2010a; 2010b; 2011; Vugrin and Camphouse, 2011; Yu et al., 2012, 2015, 2016; Park and Song, 2015). 국내에서는 Yu et al.(2014)이 재난재해에 대한 우리나라의 리질리언스를 정량적으로 평가하는데 RCI 를 이용한 바 있다. 외부력은 호우, 태풍 등의 자연재난이었으며, 시스템의 영향(SI ; Fig.

4a)은 재해연보에 보고된 피해액으로, 그리고 복구자원의 양(RE ; Fig. 4b)은 재해연보에 보고된 복구액으로 각각 평가하였다. 규모(M)가 다른 시스템(지역사회)의 리질리언스를 비교하기 위해 SI 와 RE 의 합을 지역 내 총생산 또는 인구규모로 나누어 비교하였다. 그 결과, 리질리언스가 낮은 지역과 리질리언스가 낮은 원인을 규명할 수 있었다. 이외에도 백두산 화산재 확산 시나리오에 대한 국가 리질리언스를 평가하는데 RC 를 적용한 바 있으며(Yu et al., 2016), 피지의 방재력을 평가하는데도 RC 를 적용하였다(Yu et al., 2012). 이외에도 Park and Song(2015)은 서울시의 풍수해 회복탄력성(resilience)을 평가하는데 RCI 를 활용하였다.

한편, 리질리언스도 DRASTIC과 같은 취약성 평가 방법과 유사하게 대표 지표(indicator)를 선정한 후 지수(index) 형태로 평가되기도 한다. 예를 들면, Simsek (2007)은 DRASTIC의 매개변수를 수정하여 대수층 잠재능 지수(aquifer potential index; API)를 개발하였으며, Alraggad et al.(2017)은 여기에 지하수 양수(P)의 영향을 포함시켜 기후변화에 대한 지하수 리질리언스를 평가하는데 사용하였다.

Groundwater resilience

$$= Tw \times Tr + Sw \times Sr + Rw \times Rr + Lw \times Lr + Dw \times Dr + Pw \times Pr \quad (7)$$

여기서 T , S , R , L , D , P 는 각각 투수계수(transmissivity), 비양수량(specific capacity), 함양량(recharge), 대수층의 암상(aquifer lithology), 지하수 심도(depth to water table), 양수량(abstraction)이며, 아래첨자 w 와 r 은 각각 가중치와 평가점수에 해당한다. 리질리언스 평가 결과는 DRASTIC의 취약성 평가와 유사하게 지도 형태로 나타낼 수 있다(Alraggad et al., 2017). 그러나 Fig. 4와 Table 1의 리질리언스 평가 요소에 따르면, 식(7)은 흡수력과 적용력만을 고려하고 복구력은 고려하지 않은 상태이며, 외부력(지하수 양수)의 규모를 리질리언스 평가에 사용하였다. 이런 관점에서 식(7)은 양수에 대한 대수층의 취약성 평가 결과에 가깝다.

반면, 우리나라에서 최근 MOIS(2017)은 지역안전도 산출방식을 활용하여 2가지의 재해복원력(resilience) 지수를 제안하였는데, 지수1은 기존의 지역안전도에 미래 기후변화 시나리오를 바탕으로 변화할 위험환경을 반영하는 방법이고, 지수2는 취약성 지수, 물리적 역량, 제도적 역량을 각 축으로 하는 3D 공간에서 이상적인 안전지역과의 거리로 복원력을 평가하는 방식이다. 또한, Kim et al.

(2018)은 Razafindrabe et al.(2009)의 CDRI(climate disaster resilience index)와 빅데이터 분석 기법을 이용하여 풍수해에 대한 복원탄력성(resilience) 지표를 개발하였고, 개발된 지표는 Choi et al.(2018)에 의해 안양천 유역의 시군구별 풍수해 복원탄력성을 평가하는데 활용되었다. 위 접근법들은 앞으로 국내에서 지하수 리질리언스를 평가하는데 참고할 만하다.

3. 지하수 리질리언스의 정량적 평가 방법

지하수 환경에 변화압력을 가하는 외부력을 살펴보고, 외부력 별로 Fig. 4와 같이 **SI**와 **RE** (즉, 식(3)의 **RCI**)를 이용하여 지하수 리질리언스를 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 제시해 보았다. 앞서 언급하였듯이, **RCI**는 기존의 리질리언스 평가와 달리 **SI**뿐만 아니라 **RE**까지 평가에 활용하여, 리질리언스에 대한 복구력의 기여도를 정량적으로 평가한다. 또한 식(7)과 같은 지수 형태의 평가 방법과 달리, 시공간 변화가 실시간으로 측정 가능한 물리적 인자에 기초한다는 데 있어, 향후 지하수 자동 관측 시스템과 연동하여 폭넓게 활용될 수 있다는 장점이 있다.

3.1. 외부력

현재까지 대부분의 지하수 리질리언스 연구는 물부족

국가를 대상으로 기후변화에 따른 수자원 리질리언스 확보 관점에서 연구되고 있다(MacDonald et al., 2011; Gronwall, J., Odoro-Kwarteng, S., 2017; Cuthbert et al., 2019; World bank, 2020). 이때, 외부력은 기후변화가 되고(Fig. 5), 리질리언스가 평가되는 시스템은 수자원을 공급받는 지역사회 또는 기후변화에 영향을 받는 지하수(수자원) 환경이 된다. 한편, 지하수 환경은 도시화에 의해서도 변화 압력을 받고 있는데(Lee and Koo, 2007; Chung et al., 2012; Foster, 2020; Foster et al., 2020), 도시화로 인한 외부력과 그에 대한 지하수 리질리언스 연구 사례는 기후변화에 비하면 드문 편이다. Shamsudduha (2013)는 남아시아에서 도시개발 및 기후변화에 대한 지하수 리질리언스를 논의하였다. APN E-Lib(2020)은 기후변화 및 도시의 성장과 개발에 대한 지하수 리질리언스를 평가하기 위한 프로젝트로서, 지하수가 중요한 수자원인 아시아의 주요 도시에서 지속가능한 수자원 관리를 위해 시작되었다.

본 연구에서는 도시화로 인해 지하수에 발생하는 외부력 중 ‘토지이용 변화에 따른 지하수 오염’과 ‘지하공간 개발에 따른 지하수 유출’을 외부력으로 보고, 지하수 리질리언스를 구체적으로 정의한 후 **SI**와 **RE**를 측정할 수 있는 인자를 검토해 보았다. 외부력이 정해지면 외부력으로 인한 지하수 시스템의 변화량을 측정할 수 있는 변수를 선택할 수 있는데(Figs. 6a and 7a), 이는 Fig. 4a의 Y

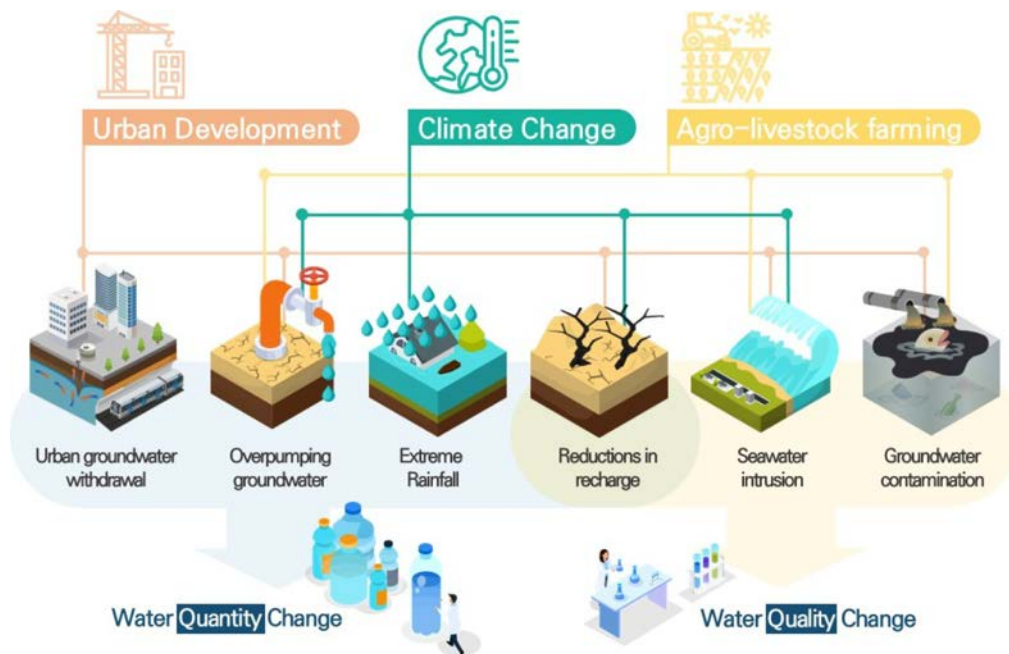


Fig. 5. External forces to groundwater system.

Table 5. Groundwater resilience to external forces in urban areas

| External force | Groundwater resilience | Parameter to assess the system impact (SI) |
|--|---|--|
| Groundwater withdrawal for the use of underground spaces | Ability to keep the groundwater level or to rapidly recover after drawdown | Groundwater level |
| Groundwater contamination by urban land use | Ability to keep the concentration level below the water quality standard and around the natural background level or to rapidly recovery after water quality degradation | Concentration of pollutants, pH, or electrical conductivity (EC) |

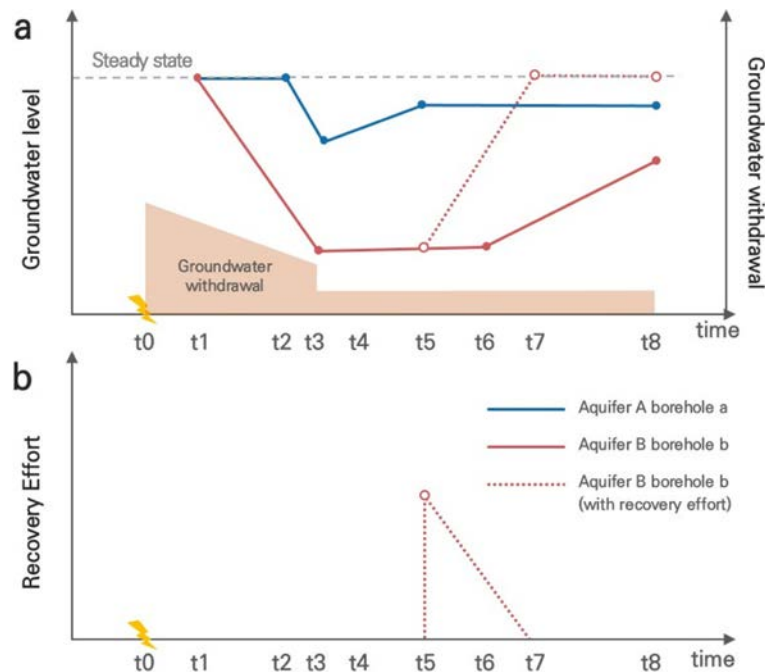


Fig. 6. Changes in water levels (system impact; SI) and recovery effort (RE) in each aquifer due to groundwater withdrawal for underground structures. The seasonal (natural) variations in water levels are ignored given the small magnitudes compared to the changes by groundwater withdrawal. The boreholes 'a' and 'b' are assumed to be located at the same distance from the pumping well and show the similar steady state before withdrawal. The water level recovered is lower than that before withdrawal in Aquifer A due to consistent pumping for the use of underground spaces and no external recovery effort. The points indicate the measurement times, and the changes between measurements are assumed to be linear.

에 해당한다(Table 5). 반면 복구자원은 다양할 수 있다(Figs. 6b and 7b). 또한, 지하수 리질리언스를 확보하기 위해서는 오염원인별로(예: 유기용제, 축산폐수) 또는 지하수 유출 행위별로(예: 지하철 및 건축물 유출 지하수 발생) 외부력을 더 세분화하여 리질리언스를 정의할 필요가 있으며, 측정 인자도 국내에 가용한 자료를 검토한 후 결정되어야 한다. 그러나 본 연구에서는 도시 지역에서의 지하수 리질리언스 개념 정립 및 정량적 평가 가능성만 살펴보기로 한다.

3.2. 유출 지하수에 대한 지하수 리질리언스

‘지하공간 개발에 따른 지하수 유출’이라는 외부력에 대

한 지하수 리질리언스는 지하수 유출 행위에도 불구하고 지하수위 변화량이 적거나 지하수위가 강하하더라도 빠르게 수위를 회복하는 능력으로 정의할 수 있다(Table 5). 이 경우, 시스템의 변화량(SI)은 지하수위(Fig. 4a의 Y에 해당)로 측정 가능할 것이다(Fig. 6a). 동일한 외부력(지하수 유출량)에 대하여 지하수체별 변화량이 다를 수 있는데, 이는 지하수 환경의 흡수력(예: 지하수체의 크기), 적응력(예: 자연함양률), 복구력(예: 인공함양 기술 및 자원, 대중 수용성)으로 설명할 수 있다(Table 1).

예를 들어, t_0 에서 지하공간 개발과 함께 유출 지하수가 대량 발생하다가 t_3 부터 일정 배수량을 유지할 경우, 양수 지점부터 관정까지의 거리와 관측 심도가 동일하더라도

대수층별로 관찰되는 수위 변화가 다를 수 있다(Fig. 6). 시나리오를 단순화하기 위해 지하수위의 계절변화 및 강우 사상이 배출량에 미치는 영향은 제외하였고, 대수층 A와 B는 유사한 지하수위를 갖는 것으로 가정하였다. Fig. 6a에서 대수층 A의 관정 a(파란색 실선)는 t_0 에서 외부력(지하수 유출)이 발생하더라도 지하수위의 변동이 미비하다. 이는 지하수 유출행위에 대한 대수층의 흡수력이 높은 경우(예: 큰 지하수체)라고 할 수 있다. 이후 t_2 에서부터 수위 저하가 시작되고 배출량이 일정하게 유지되면서(t_3) 수위를 회복하기 시작하는데, 대수층 A가 스스로 적응력을 발휘하는 경우(예: 투수성이 크거나 지하수 함양이 높은 지역)라고 할 수 있다. 여기서 회복된 수위는 지하수 유출(지하공간 개발) 이전보다 낮을 수 있는데, 이는 지하공간 개발에 따라 유출 지하수가 지속적으로 발생하면서 개발 이전과는 다른 정상상태를 가지기 때문이다(Ryu et al., 2005; Xu et al., 2016; Kim et al., 2018). Ryu et al.(2005)은 국내 도심지 지하철 및 산악 터널 굴착에 따른 지하수위 변동을 연구하였는데, 각 시공 단계별 굴착에 따른 지하수위 변화는 터널 굴착 후 1000일이 지난 시점에서 평균 5.7 m 및 최대 6.8 m 하강하였으며, 완공 후 4년이 지난 후에는 비교적 안정된 상태(터널 굴착 이전 대비 평균 1.48 m, 최대 2.8 m의 지하수위 강하)에 도달하였음을 보고하였다. 또한, 경주 방폐장의 경우에도 지하 처분장 주변으로 지하수위가 회복되어 유지되고 있다(Kim et al., 2018).

반면, 대수층 B의 관정 b(Fig. 6a의 빨간색 실선)에서는 t_1 에서부터 수위 저하가 시작되고(흡수력 낮음), t_3 부터 수위 저하가 멈추고 t_6 부터 수위 회복이 나타나지만 관측 기간 이내에 수위가 안정상태에 도달하지 못하는 경우(적

응력 낮음)에 해당한다. 만약 t_5 에서 인공함양 기술을 적용하면(복구력을 갖춤), t_7 에서 지하수 유출 이전의 수위로 회복될 가능성은 있는 경우이다. 이 경우, 복구자원(RE)은 주입한 물의 양 또는 복구비용에 해당한다(Fig. 6b). SI와 RE를 이용하여 식(2)의 RC를 평가하기 위해서는 적절한 α 가 필요하다. 또한, 식(3)을 이용하여 서로 다른 대수층을 비교하기 위해서는 M에 대한 검토도 필요하다. 한편, 동일한 대수층에서는 양수정으로부터의 거리, 관측 심도, 불균질한 지하매질 특성 등으로 인하여 관정 간에도 리질리언스의 차이가 나타날 수 있는데, Macdonald et al.(2011)은 대수층의 생산력과 지하수 저류량을 이용하여 기후변화에 대한 관정의 리질리언스를 평가한 바 있다.

동일한 외부력에 대하여 두 개의 대수층 A와 B가 서로 다른 수위 변화를 보이는 것은 유출 지하수에 대한 대수층의 흡수력, 적응력, 복구력으로 설명가능하며(Table 1), 이들 특성에 영향을 미치는 내·외부적 요인을 살펴보았다(Table 6). 비록 지하수 양수의 원인이 다르긴 하지만, ‘지하공간 개발에 따른 유출 지하수 발생(외부력)’으로 인한 시스템의 영향(SI)은 ‘기후변화 및 수요증가로 인한 과잉양수(외부력)’로 인한 SI와 유사한 형태로 나타날 것으로 보이며, 따라서 흡수력 및 적응력에 영향을 미치는 내·외부적 요인을 파악하는 데는 기존의 지하수 자원 리질리언스 연구 결과를 참고할 수 있을 것으로 보인다(예: Alraggad et al., 2017; Fuchs et al., 2018). 그러나 복구력의 경우, 빠른 지하수위 회복을 위해 활용될 수 있는 기술적, 경제적, 사회적, 제도적 자원의 양(예: 인공함양 기술 수준 및 자원) 또는 조달능력(예: 빠른 투입)이 영향을 미치기 때문에, 국내 지하수 전문가 집단의 기술 수준 이외에도 사회적 및 제도적 복구지원 환경에 대한 이해가

Table 6. Qualitative resilience capacities to artificial groundwater discharge

| Qualitative component | Internal or external factors | Source |
|-----------------------|--|----------------------------------|
| Absorptive capacity | Transmissivity (m ² /day); Specific capacity (m ² /day); | Alraggad et al. (2017) |
| Adaptive capacity | Groundwater recharge (mm/yr); Aquifer lithology; Depth to water (m) in Eq. (7) ¹⁾ | |
| Restorative capacity | Groundwater-surface water ratio of application | Fuchs et al. (2018) |
| | Policy & Legislative (e.g., groundwater preservation zone established at areas with severe drawdown of groundwater level and deterioration of groundwater quality due to groundwater withdrawal; subway tunnels should be included in facilities inducing groundwater contamination in Article 16-2 of Groundwater Act). | Chung (2010); Kim and Kim (2010) |
| | Technical (e.g., artificial recharge to refill groundwater at areas with severe drawdown of groundwater level including spreading method, induced infiltration, well recharge, in-channel modification, runoff harvesting; permeable asphalt to recover groundwater level; waterproof tunneling to avoid overpumping) | |

¹⁾Note that the abstraction was included in Eq. (7) by Alraggad et al.(2017), while it was deleted in this table because the abstraction is considered an external force in this study.

필요하다. 예를 들면, 인공함양기술에 대한 국민의 신뢰도도 복구력에 크게 영향을 미칠 수 있다. 국내에서 수행된 유출 지하수의 영향(Chung, 2010; Chung et al., 2012) 및 대수층 함양관리 기술 동향(Kim and Kim, 2010)의 연구 결과를 바탕으로 복구력에 영향을 미치는 요소들을 Table 6에 정리해 보았다.

3.3. 지하수 오염에 대한 지하수 리질리언스

지하수 양수와 비교할 때, 지하수 오염에 대한 지하수 리질리언스 연구는 해외에서도 찾아보기 힘들다. ‘지하수 오염(외부력)’에 의한 변화 압력에 대한 지하수 리질리언스는 지하수 수질기준 또는 배경치와 비교하였을 때 기준치를 초과하지 않거나 초과하더라도 빠르게 정화될 수 있는 능력으로 정의할 수 있으며, 외부력에 대한 지하수 환경의 변화량은 수화확인자로 측정 가능할 것으로 판단된다(Table 5; Fig. 7a). 예를 들면, 질소오염원이 지하수에 유입(외부력 발생)되면 질산염의 농도가 증가하게 되고, 따라서 질소오염원에 대한 지하수 시스템의 변화량(SI)은 질산염의 농도 변화로 평가할 수 있다. 또한, 일반적으로 전기전도도는 수화확인자와 높은 상관성을 가지는데 (APHA et al., 2001), 따라서 국가지하수관리측정망에서 실시간으로 측정되는 전기전도도를 이용하면 지하수 오염에 대한 대수층의 변화량(SI)을 국가 단위에서 간접적으

로 모니터링할 수도 있다.

앞서 언급하였듯이, 동일한 오염원(외부력)에 대하여 지하수 환경별로 지하수 리질리언스는 다를 수 있으며, 이는 지하수 환경의 흡수력, 적응력, 복구력으로 평가할 수 있다(Table 1). 예를 들어, t_0 부터 t_3 까지 동일한 양의 오염물질이 누출되고 누출지점부터 관정까지 거리와 관측 심도가 동일하다고 해도 대수층별로 지하수질의 변화가 다를 수 있다(Fig. 7a). Fig. 7a에서 대수층 A의 관정 a(파란색 실선)는 t_2 부터 농도가 상승하고 t_3 부터는 농도 상승이 둔화되며(오염물질 유입량 > 자연저감능력), t_5 부터는 농도가 감소하여(자연저감 우세), t_8 에서 자연배경치를 회복하는 경우이다. 반면, 대수층 B의 관정 b(빨간색 실선)에서는 t_1 부터 농도가 증가하여 오염에 취약한 경우이다(흡수력이 낮음). 이는 DRASTIC 평가 요소 중 지하수위 심도(D)가 낮거나, 강우침투량(R)이 크거나, 토양층의 저감능력(S)이 낮은 경우에 해당한다(Aller et al., 1987). 또한 t_3 부터 농도 상승이 둔화되고(오염물질 유입량 > 자연저감능력), t_7 부터 농도가 감소하지만 대수층에서의 자연저감 속도가 매우 느려(적응력이 낮아) 관찰 기간 동안 배경농도로 회복되지 못하는 경우이다. 만약 관정 b에서 관찰된 농도가 수질기준을 초과할 경우(t_2), 수질정화가 이루어진다면(복구력을 갖추고 있다면) t_4 에 자연배경농도로 회복될 수 있다(빨간색 점선). 이 경우, SI 는 농도변화,

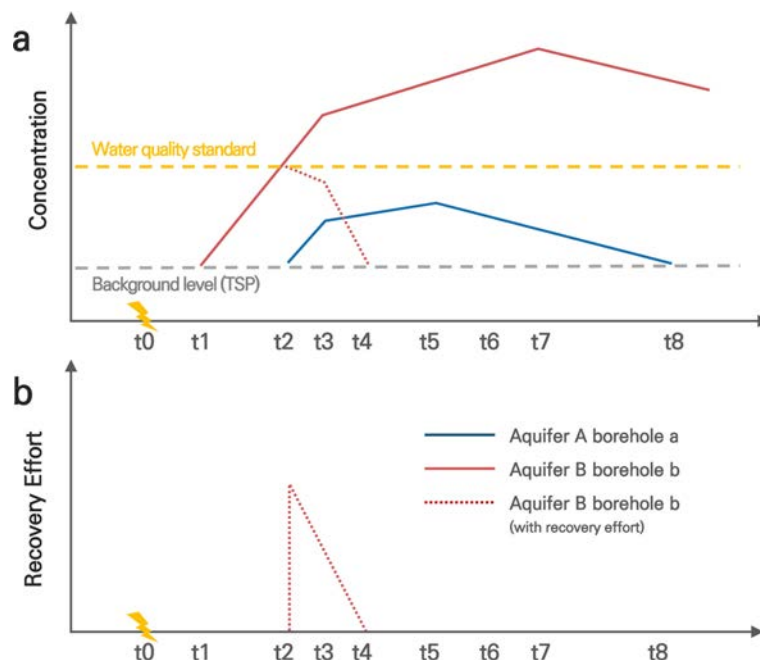


Fig. 7. Changes in concentration (system Impact; SI) and recovery effort (RE) in each aquifer due to groundwater contamination. The boreholes ‘a’ and ‘b’ are assumed to be located at the same distance from the leakage point and show the similar concentration level before contamination. The points indicate the measurement times, and the changes between measurements are assumed to be linear.

RE는 수질정화에 이용된 기술(예: 산화제 주입) 또는 비용의 크기로 평가 가능하며, 식(2)의 **RC**를 평가하기 위해서는 적절한 α 가 필요하다. 또한, 식(3)을 이용하여 서로 다른 대수층을 비교하기 위해서는 **M**에 대한 검토도 필요하다.

또한, 앞서 언급한 바와 같이, 동일한 대수층에서는 오염원으로부터 거리, 관측심도, 불균질한 지하매질특성 등으로 인하여 지하수 관정 간의 리질리언스 차이도 나타날 수 있다. 예를 들면 ‘지하수의 수질보전 등에 관한 규칙’ (별표 3)에서는 외부로부터의 오염물질 유입을 차단할 수 있도록 지표면 위로 두께가 100 mm 이상, 반경이 1,000 mm 이상으로 콘크리트 보호공을 설치하도록 하고 있는데, 이와 같은 규정에 따라서 설치된 지하수공은 다른 관정에 비하여 흡수력, 곧 내구성이 향상되어 오염원 유입을 차단하고 결과적으로 **SI**를 줄일 수 있다.

동일한 오염원에 노출되어도 지하수 오염도가 기준치를 넘지 않는 지하수 환경(또는 관정)의 경우(Fig. 7에서 대수층 A의 관정 a), 오염원으로 인한 영향(**SI**)이 적으며, 이것은 곧 흡수력 또는 적응력이 크다고 할 수 있다(Table 1; Fig. 4a). 이는 기존의 지하수 오염 취약성 평가에서 취약성이 낮은 경우를 의미한다. 리질리언스 연구는 취약성 평가 요소 이외에도 빠르게 회복할 수 있는(쉽게 정화될 수 있는) 특성(복구력)을 포함하는 것으로(Fig. 2), 복구력을 갖춘 환경에서는 대수층 B의 관정 b가 수질 기준

을 초과하지 않고 빠르게 배경수질로 회복될 수 있다는 것까지 평가한다(Fig. 7의 빨간색 점선). 여기서 외부자원 없이 이루어지는 자연저감능력의 경우는 적응력으로 평가할 수 있으며, 반면 외부자원을 활용하는 인위적 저감활동의 경우는 복구력으로 평가한다(Table 1).

지하수 오염(외부력)에 대한 지하수 환경의 흡수력, 적응력, 복구력은 다양한 내·외부적 요소에 의해 결정되며, 이들이 곧 오염원에 대한 지하수 리질리언스를 결정한다. 따라서 지하수 오염에 의한 지하수 시스템의 변화량(**SI**) 및 회복속도에 영향을 미치는 요소를 확인할 필요가 있다. 예를 들면, 동일한 양의 질소오염원이 유입(외부력 발생)되었다 하더라도 지하수체별로 질산염의 농도 변화는 다를 수 있는데, **SI**와 **RE**에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 정리하면 Table 7과 같다. 탈질미생물이 많은 지하수 환경의 경우, 자연저감능력(Choi and Lee, 2011; Embaby et al., 2017), 즉 적응력이 큰 환경이고, 지하수 정화 시스템이 잘 갖추어지고 정화기술에 대한 대중 수용성이 큰 경우는 복구력이 큰 환경으로 평가된다. 또한, 오염물질이 유출되는 상황을 방지하면 오염물질은 지하수 유동장을 따라 이루어지고 확산할 수 있는데, 따라서 Fig. 4의 시나리오 3과 같이 신속한 대응이 시스템을 회복하기 위해 필요한 **RE**를 줄이고, 궁극적으로 지하수 리질리언스를 높이는 역할을 할 수 있다. 여기서 자연저감능력은 대수층의 오염물질 저감능으로서 지하수 대수층의 적응력을 높

Table 7. Qualitative resilience capacities to groundwater contamination

| Qualitative Component | Internal or external factors | Source |
|--|--|----------------------|
| Absorptive capacity | Depth to water (D); Net recharge (R); Aquifer media (A); Soil media (S); Topography (T); Impact of vadose zone (I); Hydraulic conductivity (C) | Aller et al. (1987) |
| | Groundwater occurrence (G); Overlying upper layer lithology (O); Depth to water (D) | |
| Adaptive capacity (Natural attenuation capacity) | High adsorption potential on the aquifer clay content; The calcite and dolomite precipitate on the aquifer contact providing a chance for specific contaminants to co-precipitate; The value of attenuation capacity increases by decreasing groundwater velocity and completely vanishes at a certain high velocity | Embaby et al. (2017) |
| | Attributed to dilution, dispersion, and biodegradation; High water level, permeable uppermost layer, and frequent heavy rainfall were favorable to natural attenuation. | Choi and Lee (2011) |
| Restorative capacity | Policy & Legislative (e.g., guidance for groundwater cleanups) | US EPA (2004) |
| | Social (e.g., acceptance from regulators and public acceptance) | US DOE (1994) |
| | Technical (e.g., in-situ bioremediation including permeable reactive barriers, pump and treat systems, in situ vitrification, dechlorination, soil vapor extraction, soil flushing, chemical treatment, and air sparging) | US EPA (1994) |

이는 요소인 반면, DRASTIC에서 토양이 가진 자연저감능(S)은 대수층의 오염을 차단하는(즉, 흡수력을 증가시키는) 능력으로(Aller et al., 1987) 달리 분류될 수 있다. 한편, DRASTIC의 대수층 매질 특성(A)와 수리전도도(C)는 지하수 유동 속도에 영향을 미치고, 이는 궁극적으로는 지하수의 자연저감능력에도 영향을 미치는 요소이며(Embaby et al., 2017), 따라서 리질리언스의 정량적 평가 과정에서 이들 요소의 상호작용도 고려할 필요가 있다.

Tables 6과 7은 외부력에 대하여 시스템의 변화량을 줄이거나 변화가 있더라도 빠르게 회복되는 시스템을 만들기 위해서는 시스템의 내부적 요소(예: 대수층의 특성)뿐만 아니라 외부적 요소(예: 사회경제적 요소 및 제도적 요소)도 고려할 필요가 있다는 것을 보여준다. 특히, 사회경제적 요인은 복구력에 영향을 미친다. Cutter et al. (2008)에 따르면, 물리적, 사회적, 제도적 성분 이외에 경제적 및 생태적 성분도 리질리언스의 평가에 필요하며, 이러한 다차원적 특성으로 인해 리질리언스 평가는 쉽지 않다. Yu et al.(2014)은 우리나라가 호우 발생 시 피해액(SI) 대비 높은 복구액(RE)을 소요하는 것을 확인하였는데, 재난(외부력)의 이동 경로 및 물리적인 영향 반경(외부력의 크기) 보다는 지역사회의 낮은 복구력 및 사회적, 경제적, 정치적인 요인 등에 의한 것으로 나타났다. 토양 리질리언스의 경우, 농업 분야를 중심으로 오랫동안 외부력과 측정인자 및 그 이외 영향 요소들이 연구되어 왔는데(Lal, 1997), 내부적 요소 이외에도 토양 리질리언스에 영향을 미치는 사회경제적 및 정치적 힘도 연구되었다. 이와 유사하게, 지하수 환경에서도 자연저감 또는 정화사업에 대한 선호도 및 법과 규제가 지하수 환경의 변화 및 회복속도에 영향을 미칠 수 있을 것이며, 따라서 지하수 리질리언스를 확보하는 과정에서 복구력의 영향에 대한 상세한 이해가 필요할 것으로 판단된다. 리질리언스의 정량적 평가 기술이 리질리언스에서 복구력이 가지는 영향력을 이해하는데 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

4. 결 론

국내에서도 환경보전 및 통합물관리 측면에서 지하수 환경보전에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 사후 대응의 관점에서 벗어나 사전 예방 차원에서 지하수 환경을 보전 및 관리하기 위하여 재난재해 관리에 사용되고 있는 리질리언스 개념을 도입할 필요가 있다. 리질리언스는 외부력에 의한 변화 압력에 시스템이 저항하는 능력을 의미하는 개념으로서, 기존의 취약성 연구와 달리 외부력 발

생 이후 시스템의 복구과정까지 고려한다. 즉, 외부력에 의해 영향을 적게 받거나 영향을 받더라도 빠르게 복구할 수 있는 시스템이 리질리언스를 갖춘 시스템이 된다. 지하수 환경이 다양한 내·외부적 인자들의 상호작용으로 이루어진 복잡한 시스템임을 고려할 때, 지하수 환경을 보전하는데도 리질리언스 개념을 적용할 수 있다. 이 경우, 지하수 환경(시스템)의 리질리언스는 외부력(예: 지하수 오염, 지하수 유출, 기후변화)에 의한 수질 또는 수량 변화 압력에 저항하는(즉, 본래 수질과 수량 상태를 유지하거나 또는 본래 상태로 되돌아가려는) 능력이라고 할 수 있다.

전 세계적으로 지하수 자원(시스템)은 기후변화 및 도시화(외부력)에 의한 변화 압력을 받고 있다. 물부족 국가를 중심으로 지하수 자원의 지속적인 사용을 위해 지하수 리질리언스 연구가 최근 활발히 진행되고 있으나 국내에는 전무하다. 한편, 리질리언스를 정량적으로 평가하고 관리하기 위해서는 외부력 별로 지하수 리질리언스를 구체적으로 정의할 필요가 있다. 본 연구에서는 국내에 지하수 리질리언스 개념을 소개하고 리질리언스 확보 노력에 대한 저변을 넓히기 위해 ‘지하수 유출’과 ‘지하수 오염’의 2가지 외부력에 대하여 지하수 리질리언스를 각각 정의하고 측정 방법을 검토하였다. 특히, 국내에서 재난재해 리질리언스를 정량적으로 평가하는데 활용된 바 있는 리질리언스 비용 지수(RCI)를 상세히 분석하였으며, 동일한 외부력에 대하여 지하수 환경에 따라 지하수 리질리언스가 다른 이유를 외부력에 대한 지하수 환경의 흡수력, 적응력, 복구력으로 세분하여 평가하였다. 흡수력, 적응력, 복구력이 클수록 지하수 리질리언스는 높아진다. RCI는 복구과정에 소요되는 복구자원(RE, 예: 오염정화의 경우, 산화제, 인공함량의 경우, 주입수)의 양까지 리질리언스 평가에 이용하는 방법으로, 시스템의 영향(SI)만으로는 확인할 수 없는 복구력의 리질리언스 기여도까지 평가 가능하다.

향후 사례 분석을 통해 외부력에 대한 지하수 환경의 리질리언스를 높일 수 있는 요인들(예: 질소오염의 경우, 자연저감과 관련되는 탈질미생물 또는 황철석과 같은 전자공여체 존재)을 규명할 필요가 있다. 주요 요인이 규명되면, 그 요인들을 중심으로 국가 차원의 지하수 리질리언스 평가가 가능해지고, 그 결과를 기반으로 리질리언스가 낮은 지역에 대해 리질리언스 확보 노력을 집중할 수 있을 것이다. 아울러 지하수 리질리언스의 정량적 평가 및 관리 기술은 토양과 같은 다른 지질환경의 리질리언스 또는 지질재해(지진, 산사태 등의 외부력)에 대한 국가 리질리언스를 평가하는데도 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 외부력에 의한 시스템의 영향을 측정할 수 있는 물리적 인자(Fig. 4a의 Y) 또는 복구과정에 소요되는 복구 자원의 양을 가늠할 수 있는 물리적 인자(Fig. 4a의 RE)를 선정하는 것이 어려울 수 있는데, 이 경우에는 빅데이터 분석 기법을 이용하여 식 (7)과 같이 지수 형태로 평가하는 방법도 고려해 볼 수 있다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업(GP2021-007)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Aamir, M.S., 2011, Value of Resilience from Critical Infrastructure Perspective, *Invited talks on Critical Infrastructure Resilience*, Daejeon, Korea.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.H., and Hackett, G., 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings, USEPA Report 600/2- 87/035
- Alraggad, M., Johnsen-Harris, B., Shdaifat, A., Abugazleh, M.K., and Hamaideh, A., 2017, Groundwater resilience to climate change in the eastern Dead Sea basin – Jordan, *Scientific Research and Essays*, **12**(3), 24-41.
- APHA, AWWA, WEF, 2001, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st ed. American Public Health Association, Washington, DC.
- APN E-Lib, 2020, Mapping groundwater resilience to climate change and human development in Asian cities, <https://www.apn-gcr.org/resources/items/show/2087> [accessed 21. 02. 16].
- Appelo, T. and Postma, D., 2005, Geochemistry, Ground Water and Pollution, CRC Press.
- British Geological Survey, 2019, Gateway to the Earth: Science Strategy For The British Geological Survey 2019-2023, 33p.
- British Geological Survey, 2021, Groundwater resilience: some definitions, <https://www2.bgs.ac.uk/groundwater/international/africangroundwater/definitions.html> [accessed 21. 10. 21]
- Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W.A., and von Winterfeldt, D., 2003, A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities, *Earthquake Spectra*, **19**(4), 733-752.
- Chang, S.E. and Shinozuka, M., 2004, Measuring improvements in the disaster resilience of communities, *Earthquake Spectra*, **20**(3), 739-755.
- Choi, C., Kim, Y., Kim, J., Kim, D., Kim, J., and Kim, H.S., 2018, Indicator development and evaluation of storm and flood resilience using big data analysis: (2) Evaluation of resilience, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, **18**(4), 109-123.
- Choi, H.-M. and Lee, J.-Y., 2011, Groundwater contamination and natural attenuation capacity at a petroleum spilled facility in Korea, *Journal of Environmental Sciences*, **23**(10), 1650-1659.
- Chung, S.Y., 2010, Groundwater obstructions and countermeasures for groundwater discharge from subway in Seoul, Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, **46**(1), 61-72.
- Chung, S.Y., Kim, T.H., and Park, N., 2012, The Influence of the surrounding groundwater by groundwater discharge from the subway tunnel at suyeong district, Busan city, *Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, **17**(2), 28-36.
- 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 Environmental Change*, **18**(4), 598-606.
- Embaby, A.A., Sadek, M.A., and Rayan, R.A., 2017, Natural attenuation capacity indicators for groundwater remediation to the northeastern cairo, *Journal of Geoscience and Environment Protection*, **5**, 152-168.
- Foster, S., 2020, Global Policy Overview of Groundwater in Urban Development-A Tale of 10 Cities! *Water*, **12**(2), 456; doi:10.3390/w12020456
- 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.
- Fuchs, E.H., Carroll, K.C., and King, J.P., 2018, Quantifying groundwater resilience through conjunctive use for irrigated agriculture in a constrained aquifer system, *Journal of Hydrology*, **565**, 747-759.
- Gronwall, J. and Oduro-Kwarteng, S., 2017, Groundwater as a strategic resource for improved resilience: a case study from peri-urban Accra, *Environmental Earth Sciences*, **77**(1), 6.
- Gunderson, L.H., 2000, Ecological resilience - in theory and application, *Annual Review of Ecology and Systematics*, **31**(1), 425-439.
- Holling, C.S., 1973, Resilience and stability of ecological systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, **4**, 1-23.
- Im, J., Rizzo, C.B., and de Barros, F.P.J., 2020, Resilience of groundwater systems in the presence of Bisphenol A under

- uncertainty, *Science of the Total Environment*, **727**, 138363.
- Kang, H.J., Jung, S.K., Maeng, S.J., and Jang, C.D., 2015, Analysis for drought resilience of monoculture on climate change, *Crisisonomy*, **11**(1), 63-81.
- 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, Y., Choi, C., Bae, Y., Kim, D., Kim, D., and Kim, H. S., 2018, Indicator development and evaluation of storm and flood resilience using big data analysis:(1) development of resilience indicators, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, **18**(4), 97-107.
- Kim, Y.C. and Kim, Y.J., 2010, A review on the state of the art in the management of aquifer recharge, *Journal of the Geological Society of Korea*, **46**(5), 521-533.
- Kim, Y.-T., Hyun, S.G., Cheong, J.-Y., Woo, N.C., and Lee, S., 2018, Hydrogeochemistry in the coastal area during construction of geological repository, *Journal of Hydrology*, **562**, 40-49.
- Kwon, S.A., 2018, A study on local economic resilience after disasters through time series analysis-focusing on the sewol ferry disaster, *The Journal of the Korea Contents Association*, **18**(5), 456-463.
- Lal, R., 1997, Degradation and resilience of soils, *Philosophical Transactions of The Royal Society B: Biological Sciences*, **352**(1356), 997-1010.
- Lee, G.M., Cha, K.U., and Yi, J., 2013, Analysis of non-monotonic phenomena of resilience and vulnerability in water resources systems, *Journal of Korea Water Resources Association*, **46**(2), 183-193.
- Lee, J.Y. and Koo, M.H., 2007, A review of effects of land development and urbanization on groundwater environment, *Journal of the Geological Society of Korea*, **43**(4), 517-528.
- MacDonald, A.M., Bonsor, H.C., Calow, R.C., Taylor, R.G., Lapworth, D.J., Maurice, L., Tucker, J., and Ó Dochartaigh, BÉ, 2011, Groundwater resilience to climate change in Africa, British Geological Survey Open Report, OR/11/031. 25 pp.
- MacDonald, A.M., Bonsor, H.C., Taylor, R., Shamsudduha, M., Burgess, W.G., Ahmed, K.M., Mukherjee, A., Zahid, A., Lapworth, D., Gopal, K., Rao, M.S., Moench, M., Bricker, S., Yadav, S.K., Satyal, Y., Smith, L., Dixit, A., Bell, R., van Steenberg, F., Basharat, M., Gohar, M.S., Tucker, J., Calow, R.S., and Maurice, L., 2015, Groundwater resources in the Indo-Gangetic Basin: resilience to climate change and abstraction. British Geological Survey Open Report, OR/15/047, 63pp
- Manyena, S.B., 2006. The concept of resilience revisited, *Disasters*, **30**(4), 433-450.
- Maurice, L., Taylor, R., MacDonald, A., Sanga, H., Johnson, P., Darling, G., and Gooddy, D., 2010, Case study note: Resilience of intensive groundwater abstraction from weathered crystalline rock aquifer systems to climate change in sub-Saharan Africa, BRITISH GEOLOGICAL SURVEY Internal Report IR/10/105, 37 pp.
- MOIS (Ministry of the Interior and Safety), 2017, Study on disaster prevention projects and regulations, Sejong.
- NDMI (National Disaster Management Institute), 2010, Development of the Indicators and Checklist for Diagnosis of the Urban Resilience, Ulsan.
- Park, H.N. and Song, J.M., 2015, Identification of main factors affecting urban flood resilience using resilience using resilience cost index - A case of flooding in Seoul city, Korea, *Journal of Korea Planning Association*, **50**(8), 95-113.
- Paton, D. and Johnston, D., 2001, Disasters and communities: vulnerabilities, resilience, and preparedness, *Disaster Prevention and Management*, **10**(4), 270-277.
- Paton, D. and Johnston, D., 2006. Disaster Resilience: An Integrated Approach. Charles C. Thomas, Springfield, IL.
- Razafindrabe, B.H.N., Parvin, G.A., Surjan, A., Takeuchi, Y., and Shaw, R., 2009, Climate disaster resilience: Focus on coastal urban cities in Asia, *Asian Journal of Environment and Disaster Management*, **1**(1), 101-116.
- Rose, A., 2007, Economic resilience to natural and manmade disasters: multidisciplinary origins and contextual dimensions, *Environmental Hazards*, **7**(4), 383-398.
- Ryu, D.W., Son, B.K., Song, W.K., and Joo, K.S., 2005, A study of probabilistic groundwater flow modeling considering the uncertainty of hydraulic conductivity, *Tunnel and Underground Space*, **15**(2), 145-156.
- Shamsudduha, M., 2013, Groundwater resilience to human development and climate change in South Asia, GWF Discussion Paper 1332, Global Water Forum, Canberra, Australia.
- 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.
- Simsek, C., 2007, The GIS-integrated surficial aquifer potential mapping and its importance for aquifer protection, Kucuk Mendere Basin/West Turkey. State Hydraulic Works. International Congress on River Basin Management. Vol. 2224.
- Tierney, K. and Bruneau, M., 2007, Conceptualizing and measuring resilience: a key to disaster loss reduction, TR News May-June, 14-17.
- US DOE (Department of Energy), 1994, In situ remediation

integrated program, Technical Summary, DOE/EM-0134P

US EPA (Environmental Protection Agency), 1994, Groundwater Treatment Technology Resource Guide, EPA/542-B-94-009

US EPA (Environmental Protection Agency), 2004, Handbook of Groundwater Protection and Cleanup Policies for RCRA Corrective Action. EPA530-R-04-030

Vugrin, E.D. and Camphouse, R.C., 2011, Infrastructure resilience assessment through control design, *International Journal of Critical Infrastructure*, **7**(3), 243-260.

Vugrin, E.D., Turnquist, M.A., and Brown, N.J.K., 2010a, Optimal recovery sequencing for critical infrastructure resilience assessment. Sandia report, SAND2010-6237.

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., and Camphouse, R.C., 2010b, 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.

World bank, 2020, Managing Groundwater for Drought Resilience in South Asia. Delivered under the South Asia Water Ini-

tiative (SAWI) Regional Cross-Cutting Knowledge, Dialogue, and Cooperation Focus Area.

Xu, Y.S., Shen, S.L., Ren, D.J., and Wu, H.N., 2016, Analysis of factors in land subsidence in Shanghai: a view based on a strategic environmental assessment, *Sustainability*, **8**(6), 573.

Yu, S.Y., 2011, A review of critical infrastructure resilience study as the future area of geosciences, *Economic and Environmental Geology*, **44**(6), 533-539.

Yu, S., An, H., Kim, S. W., Lee, K. H., and Kim, J.M., 2014, Impact analysis of disaster recovery using resilience cost index, *Journal of Environmental Policy and Administration*, **22**(1), 31-54.

Yu, S., Kim, S.W., Park, K.H., Oh, C.W., Park, D.K., and Kim, C.Y., 2012, Quantitative resilience analysis of Fiji to cyclones, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, **12**(2), 55-63.

Yu, S., Kim, S.-W., Oh, C.-W., An, H., and 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.