

지하수 부존량 평가를 위한 초전도중력계 활용

오정근¹ · 김성욱² · 유순영^{3*} · 신제현³ · 황세호³ · 최승찬²

¹국가수리과학연구소 공공기반연구부, ²(주)지아이 지반정보연구소,

³한국지질자원연구원 지하수자원연구센터

Application of Superconducting Gravimeters for Evaluating Groundwater Storage

John J. Oh¹, Sung-Wook Kim², Soonyoung Yu^{3*}, Jehyun Shin³, Seho Hwang³, and Sungchan Choi²

¹National Institute for Mathematical Sciences, Daejeon 34047, Republic of Korea

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

³Korea Institute of Geoscience and mineral resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

ABSTRACT

Gravity measurements are attracting attention for monitoring groundwater storage changes due to their sensitivity to subsurface mass variations. Changes in groundwater storage through recharge or extraction lead to mass redistribution within the subsurface, which induces subtle variations in surface gravity. These variations can be detected using gravimeters. Recently, high-precision superconducting gravimeters (SGs) have been emerged as a new approach to groundwater monitoring. The SGs can detect gravity variations as small as 0.1 μGal, allowing to track subtle gravity changes induced by groundwater fluctuations. The SGs are well-suited for detecting long-term and gradual mass changes associated with groundwater, and can provide insights into aquifer heterogeneity. These characteristics highlight their substantial potential in hydrogeological investigations. This paper presented the fundamental principles and key advantages of SGs, and explored their applicability to groundwater monitoring through a review of selected case studies. Additionally, it reviewed essential aspects of data processing and correction, and proposed future directions for the broader application of SGs. Although the successful application of SGs to groundwater studies requires the isolation of groundwater signals through precise data corrections with various auxiliary observations (e.g., groundwater levels), interdisciplinary collaboration can facilitate this process. This, in turn, enables the early detection of groundwater changes and supports sustainable groundwater resources management.

Key words : Groundwater storage, Monitoring, Superconducting gravimeter, Data corrections, Groundwater signals

1. 서 론

지하수는 인류와 생태계에 필수적인 자원으로, 지속적인 모니터링을 통한 효율적인 활용과 관리가 매우 중요하다.

주저자: 오정근, 국가수리과학연구소 선임연구원
공저자: 김성욱, (주)지아이 대표이사; 신제현, 한국지질자원연구원 책임연구원; 황세호, 한국지질자원연구원 책임연구원; 최승찬, (주)지아이 연구원
*교신저자: 유순영, 한국지질자원연구원 선임연구원
E-mail: iamysy@kigam.re.kr

Received : 2025. 7. 5 Reviewed : 2025. 7. 16
Accepted : 2025. 8. 18 Discussion until : 2025. 8. 31

전통적으로 지하수의 변화는 관측정에서 이루어지는 수위, 전기전도도, 온도 등의 연속 측정이나 지하수 채수 후 이루어지는 수질 분석 등을 통해 파악해 오고 있다. 이들 관측정 자료는 국소 지역에서 지하수의 수량 및 수질 변화를 파악하는 데 유용하게 사용될 수 있으나, 관측정 분포 밀도의 한계로 인해 유역 규모에서 지하수 부존량 변화를 정량적으로 평가하는 데에는 제약이 따른다.

지하수위 변화로 인한 지하 질량 분포 변화를 직접 감지할 수 있는 중력측정 기법이 지하수 부존량 변화를 평가하는 수단으로 주목받고 있다(Pool and Eychaner, 1995; Christiansen et al., 2011; Wilson et al., 2012a). 지하수 함양 또는 과도한 양수로 인한 지하수 부존량의 변화는

지하 매질 내 질량 재분포를 초래하여 지표 중력가속도에 미세한 변화를 유발하는데, 중력계를 통해 이러한 변화를 검출할 수 있기 때문이다. 물리적으로, 지하수가 함양되면 함양되는 지하수의 질량만큼 중력이 증가하고, 지하수가 유출되면 중력이 감소한다. 넓은 지역에 걸쳐 10 cm 높이(h)로 지하수가 함양되면 이론적으로 식 (1)과 같이 약 0.8 μGal 의 중력이 증가한다.

$$\Delta g_B = 2\pi G \Delta \rho h = 0.839 \mu\text{Gal} \quad (1)$$

식 (1)은 지하 구조의 밀도 변화로 인한 중력이상을 추정하기 위해, 측정된 중력값에서 고도 및 지형 등의 영향을 제거하는 데 사용되는 부게 보정(bouguer correction) 수식으로, 여기서 G 는 뉴턴의 중력상수로, $6.674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 이고, $\Delta\rho$ 는 대수층의 체적 밀도 변화로, 0.2 g/cm^3 를 가정하였다(공극률 0.2 가정). 즉, 유효 공극(0.2)의 포화로 인한 체적 밀도 변화를 고려하였으며, 고체 매질의 체적 밀도 변화는 없다고 가정하였다. 중력의 크기에서 1 μGal 은 10^{-8} m/s^2 의 물리량으로 매우 작은 값에 해당하지만, 현재 널리 사용되는 중력계로 감지할 수 있는 수준이다. 따라서 지하수위가 수 m 변화하거나 광범위한 대수층에 걸쳐 수십 cm의 저류 변화가 발생하면 수 μGal 이상의 중력 변화가 발생하며, 이는 지하수 부존량 변화를 나타내는 중요한 지표가 될 수 있다(Pool and Eychaner, 1995). 이런 원리에 기초하여 세계 여러 지역에서 중력탐사 기법을 활용하여 지하수 함양과 고갈을 추적하는 연구들이 수행되고 있다(Pool and Eychaner, 1995; Gehman et al., 2009; Chen et al., 2020).

구체적으로 살펴보면, 1990년 무렵부터 중력을 반복 측정하는 방법을 통해 대수층의 저장량 변화 및 자유면 대수층의 비산출률(specific yield, S_y)을 추정하려는 시도가 이루어졌다(Pool and Eychaner, 1995; Gehman et al., 2009). 관측내 수위 변화를 이용하여 지역 전체의 지하수 부존량 변화를 추정하기 위해서는 대수층의 물리적 특성(예: 공극률)에 대한 측정이 필요하다. 반면, 중력측정은 공극에 채워진 물의 순 질량 변화를 통합적으로 반영하므로, 지하수의 유효한 증감량을 직접 측정할 수 있다(Pool and Eychaner, 1995). 이러한 원리를 이용하여 미국 지질 조사국(USGS)은 이동식 절대중력계 장비(A-10)를 지하수 관정 인근에 설치하여 중력값을 반복 측정함으로써 지하수 저류량 변화를 모니터링하는 연구를 수행하였다(Kennedy et al., 2021). 한편, 측정한 중력으로부터 얻은 지하수 질량 변화를 관측내 수위 변화 자료와 결합하면 대수층의 비산출율을 역으로 추정하는 것도 가능하다(Gehman et al., 2009; Chen et al., 2018, 2020, 2021). 특히, 대만에서 절대중력 자료를 기반으로 비산출율을 추정하는 연구가 다수 수행된 바 있다(Chen et al., 2018, 2020, 2021). 대만은 전통적으로 수자원이 부족한 섬나라로, 반도체 제조업이 국가의 주요 산업이 되면서 수자원 확보가 더욱 중요하게 되었다. 이에 Chen et al.(2021)은 수 μGal 수준의 정밀 중력 관측과 수문 자료를 결합하여 지역 규모에서 대수층 특성(예: 침투계수, 비산출율)을 산정하였으며, 지표부터 지하 30 m 깊이까지 비산출율 프로파일을 구축하였다(Fig. 1). Chen et al.(2020)은 중력 기반 비산출율 산정 기법이 양수시험을 보완 또는 일부 대체하여 더

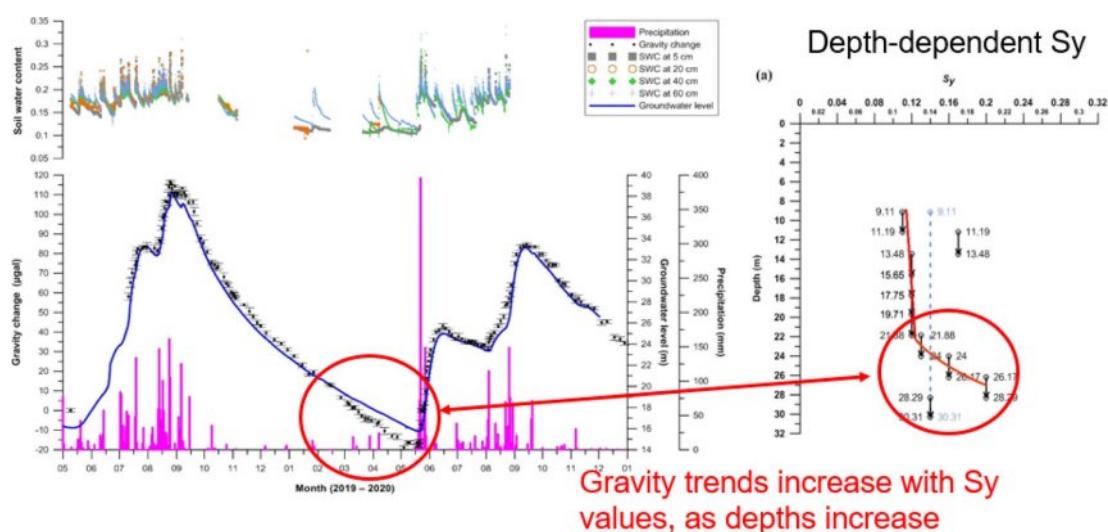


Fig. 1. 1.5-year absolute gravity measurements at the Pingtung artificial recharge lake, Taiwan. (**left**) gravity changes as well as rainfall, groundwater level, and soil water content, (**right**) depth-dependent specific yield (S_y) values (modified from Chen et al. (2021)).

조밀한 비산출을 분포를 획득하는 데 활용될 수 있을 것으로 전망하였다. 이외에도 Murty and Raghavn (2002)는 결정질암반에서 지하수를 탐사하는 방법으로도 중력 탐사가 유용할 수 있음을 확인하였는데, 지하수 산출능력이 높은 관정이 위치한 화강암 주변으로 풍화 및 파쇄대의 영향으로 음의 중력값이 관찰되었다.

국내에서는 Eom et al.(2009)가 이동식 기조력 중력계를 이용하여 지하수위 변동에 따른 중력 변화를 성공적으로 관측하고, 중력 변화 관측이 대수층의 물수지 분석 및 수자원 모니터링 기술로써 유용하게 활용될 수 있을 것으로 평가하였다. 최근에는 Jeon et al.(2019)가 지하수위를 이용하여 지하수 함양 변화량을 평가한 후 GRACE 인공 위성의 중력자료와 비교하였다. Jeon et al.(2019)은 후속 연구를 통하여 GRACE 중력자료와 지하수 함양 변화량의 상관성을 향상시키면, 향후 GRACE 중력자료만으로도 지하수 함양량을 산정할 수 있을 것으로 기대하였다. 그러나 인공위성 중력자료는 수십~수백 km 수준의 낮은 해상도로 인해 세부 지역의 중력 변화를 구분하기 어렵기 때문에, 공간적 이질성이 커 국지적 분석이 필요한 국내 환경에서는 활용에 한계가 있을 수 있다.

최근 들어 중력측정 기술의 발달로 높은 정밀도의 초전도중력계(superconducting gravimeter)가 개발됨에 따라, 지하수 변화 모니터링에 대한 새로운 접근이 가능해졌다. 초전도중력계는 0.1 μGal 수준의 중력 변화까지 검출할 수 있는 계기로, 기존 휴대용 상대중력계(relative gravimeter)나 절대중력계(absolute gravimeter)에 비해 월등히 뛰어난 분해능을 지닌다(Prothero and Goodkind, 1968; Goodkind, 1999). 이러한 고감도의 초전도중력계를 지하수 연구에 도입하면, 지하수 함량 변화를 실시간 모니터링하여 보다 상세한 지하수 부존량 파악이 가능할 것으로 기대된다. 특히 기후 변화와 인구 증가로 인해 지하수 자원의 변동성이 커지는 현시점에서, 중력측정을 활용한 지하수 모니터링은 수자원 관리에 유용한 정보를 제공할 수 있다(Lien et al., 2022). 예를 들면, 초전도중력계 데이터를 통해 강우-함양-유출의 수문 순환 과정에서 지하수 저장량의 동태를 연속적으로 파악할 수 있는데(Voigt et al., 2021), 이는 기존의 수위 모니터링만으로는 얻기 어려운 통합 정보에 해당한다(Wilson et al., 2012b). 이외에도 카르스트 대수층이나 대규모 불투수층 분포 지역처럼 지하수 변동이 공간적으로 복잡한 경우, 중력자료는 전체 시스템의 거동을 파악하는 데 필수적인 단서를 제공할 수 있다(Kim et al., 2007; Voigt et al., 2021).

비록 중력자료는 지하수 변화의 공간 분포나 심도 정보를

직접 제공하지 못하므로, 효과적인 해석을 위해서는 수리 모델, 지하수위 계측, 지질자료 등과의 통합 분석이 필요 하지만(Chen et al., 2018, 2020), 현재 중력측정 기법은 지하수 시스템의 변화 감시에 있어 기존의 수위 관측을 보완하는 유용한 도구로 인정받고 있다. 특히 초전도중력계의 보급과 중력변화의 연속 기록 기술이 일반화되면서, 중력계를 이용하여 지하수 환경 변화를 실시간으로 모니터링하려는 노력이 증가하고 있다(Wilson et al., 2012b; Voigt et al., 2021). 본 논문은 초전도중력계의 원리와 장점을 설명하고 연구 사례들을 통해 초전도중력계가 국내 지하수 모니터링에 어떻게 활용될 수 있는지를 논의해 보고자 하였다. 또한, 자료 해석 및 보정 과정에서 고려해야 할 사항들을 검토하고, 향후 활용도를 제시하고자 한다.

2. 지하수 탐지를 위한 중력측정 기법

2.1. 중력계의 종류

지하수 탐지에 사용되는 중력측정 기법은 사용 중력계의 운용 방식에 따라 크게 상대중력계, 절대중력계, 초전도중력계로 구분된다.

2.1.1. 상대중력계

상대중력계는 탄성 스프링에 질량을 매달아 중력 변화를 측정하는 전통적인 장비로, Scintrex (캐나다)의 CG-5, CG-6 모델과 LaCoste-Romberg (미국) 중력계, Burris (미국) 중력계 등이 있다. 국내에서는 Scintrex, Burris 등이 많이 사용되고 있다. 이들은 휴대하여 현장에서 측정할 수 있고, 수 μGal 수준의 정밀도를 가지고 있어, 규모가 비교적 큰 지역에서 지하수 변화에 의한 중력 이상을 감지하기에 충분하다. 다만 실제 중력 변화가 없어도 측정 조건(예: 환경 잡음)과 장비 자체의 변화인 드리프트(drift)가 발생하므로 연속 측정 전·후 기준점에서 보정 측정을 반복하거나 일정한 시간 간격으로 기준점을 측정하여 보정하는 과정이 필요하다.

상대중력계를 활용한 사례로, Lien et al.(2022)가 타이베이 인근의 타툰 화산군(Tatun Volcanic Group, TVG)에서 지하수 기인 중력 변화 관측을 통해 대수층 구조와 지하수 흐름 특성을 규명한 연구가 있다(Fig. 2). 이 지역은 활화산지대로서, 지하수의 이동이 화산 활동과 연관되어 중력 변화를 유발할 수 있다. 연구진은 2012년에 두 대의 CG-5 상대중력계를 이용하여 TVG 일대 31개 지점에서 네 차례에 걸친 반복 중력 측정을 실시하였고, 정밀 보정을 통해 약 $\pm 8 \mu\text{Gal}$ 수준의 표준 오차로 중력 변동을 확보

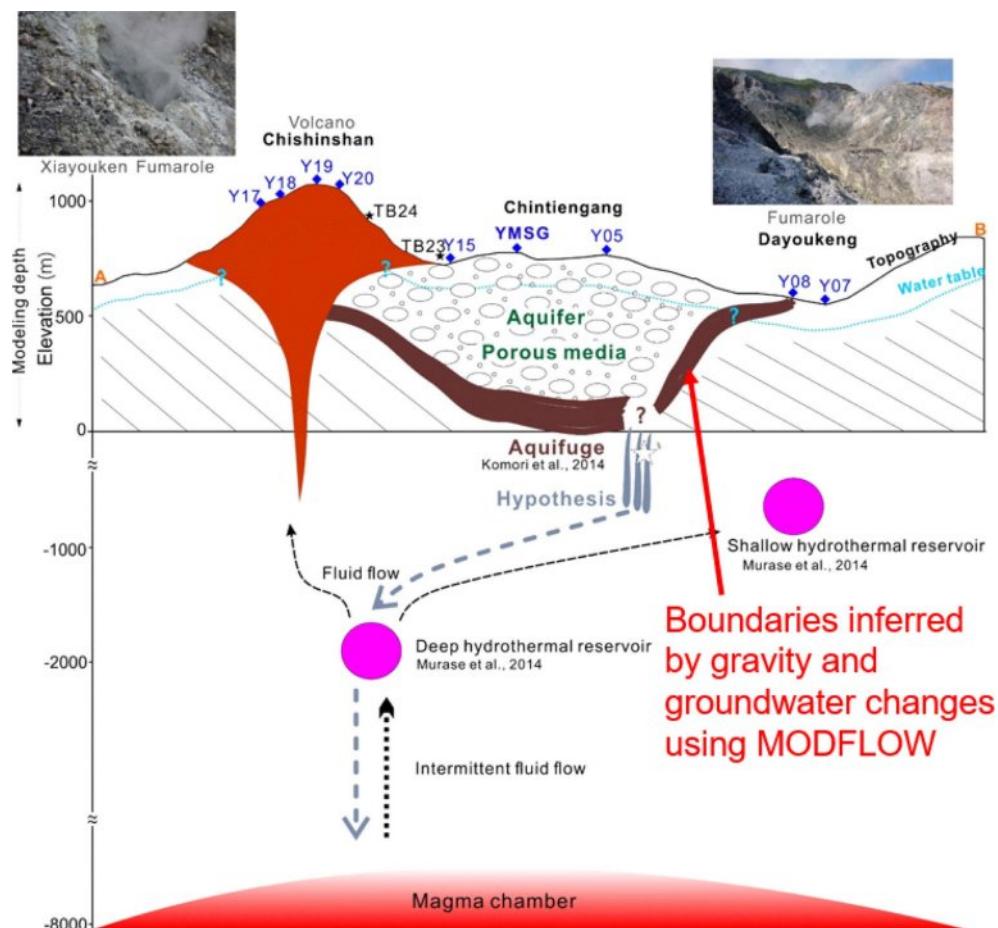


Fig. 2. Hydrogeological structure inferred by gravity changes in the Tatan Volcano Group (TVG), Taiwan. The porous media form an aquifer below the central TVG. Fluids from the deep hydrothermal reservoir migrate to the east and west of the TVG, where the major fumaroles are located (Modified from Lien et al. (2022)).

하였다. 관측된 중력변화 패턴을 해석하기 위해, 하나의 투수층으로 이루어진 Model A와 MODFLOW 기반의 동적 지하수 모형 Model B를 구축하여 중력 변화를 계산하였다. 그 결과, 화산군 중앙부 지역에서는 중력 관측값이 두 모델의 모의 결과와 대체로 부합하여, 중앙부의 지하수는 천부 대수층의 특성을 보임을 확인하였다. 반면, 동부와 서부 지역의 관측 중력 변화는 모형 예측치로부터 최대 +40에서 -80 μGal 까지 크게 벗어났으며, 시간 경과에 따라 서로 반대 방향의 변화를 나타냈다. 이러한 비정상 중력 신호는 지표 함양과 배출만 고려하는 천부 대수층 모형으로는 설명될 수 없다. 이에 연구진은 화산 심부의 유체가 대체로 동쪽과 서쪽 대수층을 보충하는 심부 유동 현상을 그 원인으로 추론하였다. 즉, TVG 동쪽과 서쪽에는 중앙부를 비껴 가는 심부 열수 흐름 통로가 존재하여, 지하 깊은 곳의 유체가 이를 측면 대수층을 번갈아 재충전하고 있는 것으로 해석하였다. 이 연구는 화산 지대에서 지하수

유동에 따른 중력 변화를 관측함으로써 천부 대수층과 심부 유체 흐름을 구분하고 화산 대수층의 공간적 범위를 밝혀 낸 사례이다. 이러한 결과는 화산 지하수계에 대한 이해를 높여 화산성 지진이나 분화 현상의 전조를 파악하는데 기여할 수 있으며, 지하수 자원 관리 측면에서도 화산 지역의 잡재 수자원 및 심부 유체 유입 경로를 파악하는 데 도움을 줄 것으로 기대된다.

2.1.2. 절대중력계

절대중력계는 진공 상태에서 물체의 자유낙하 운동을 레이저 간섭계로 계측함으로써 중력가속도의 절대값을 측정하는 장비로, 이동 설치가 가능하며 일반적으로 수 μGal 정밀도를 갖는다. 대표적인 절대중력계인 FG5 계열은 약 $\pm 10 \mu\text{Gal}$ 이내의 정밀도로 절대중력을 측정 할 수 있으며, 여러 시기에 걸쳐 반복 측정하면 중력의 시계열 변화를 파악할 수 있다. 그러나 절대중력계는

휴대가 어렵고 장기간의 연속 측정에는 한계가 있어, 주로 특정 시점에서의 중력 변화를 모니터링하는 용도로 활용된다.

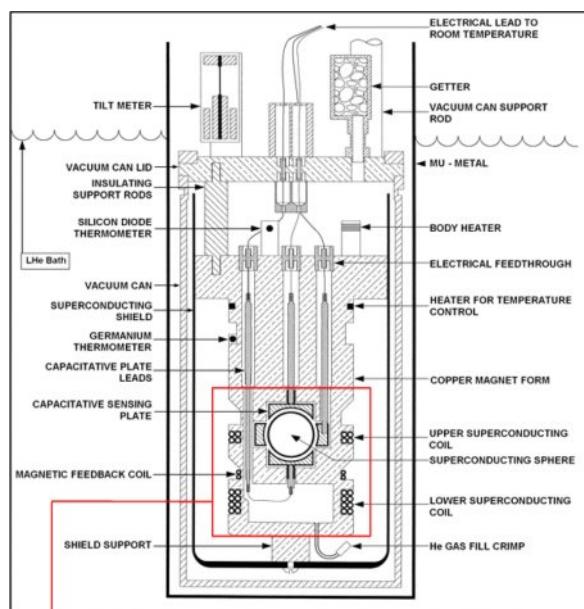
Chen et al.(2023)은 대만 용린 현 지반침하 지역에서 수문 자료에 의존하지 않고도 지하수 변화량을 직접 추정하기 위해 절대중력을 측정하고, 중력 기반 지하수 질량 수지를 추정하는 연구를 수행하였다. 대만 용린 현의 일부 지역은 지하수 과잉 취수로 인한 지반침하 문제가 심각하여, 인공함량 등의 대책이 강구되고 있는 곳이다. 인공함양의 가능성을 평가하기 위해 연구진은 2021년 용린 현 일대에 7개의 절대중력 관측 지점을 설치하여 시계열 중력(time-lapse gravity) 변화를 측정하였다. 이 중 5개 지점은 지반침하가 두드러진 지역의 자유면 대수층 상부에 위치하였다. 관측된 중력자료에서 지각 조석 및 고도 변위(침하)에 의한 효과를 보정하여 순수하게 지하수 부존량 변화에 따른 잔차 중력(residual gravity) 변화를 추출하고, 이를 통해 사전 수문 정보(예: 지하수위, 저류계수) 없이도 대수층의 지하수 저장량 변화를 산정하였다. 분석 결과, 모든 관측점에서 중력 증감이 지하수 증감과 일관된 양상을 보여 침하 지역에 위치한 자유면 대수층에는 함양(보충) 가능성이 있음을 확인하였다. 특히 Siutan 초등학교(STES) 지점에서는 3월부터 9월 사이 중력이 약 26.6 μGal 증가하고 그 동안 지반이 4.2 cm 하강하는 현상이 동시에 관측되었는데, 이는 우기 기간 함양된 지하수가 이 지점 주변 대수층으로 보충되었음을 의미한다. 지반침하가 발생했음에도 하부 대수층에 지하수가 함양되어 중력값이 증가한 사례로, 이를 통해 연구진은 인공함양 효율 관점에서 타 관측지역과 비교하여 STES 지역이 최고라 평가하였다. 추가적으로, 연구팀은 전기비저항탐사(Electrical Resistivity Imaging; ERI)를 병행하여 STES 인근의 대수층 구조를 파악하였으며, 향후 중력과 ERI의 통합적 활용을 통해 인공 함양지 건설 등 침하 저감 대책을 모색할 수 있다고 제언하였다.

이외에도 Jacob et al.(2010)은 약 100 km² 규모의 카르스트 대수층에서 수분 저장량 변화를 파악하기 위해 절대 중력 측정과 시계열 미세중력 측정(time-lapse microgravity)을 병행하여 수행하였다. 총 2년에 걸쳐 4회의 중력 측정이 진행되었으며, 상대중력은 40개 지점에서, 절대중력은 각 시기마다 3개 지점에서 측정되었다. 측정 정밀도는 2.4~5 μGal 수준이며, 이는 약 0.25 m의 수위 변화에 해당하는 중력 변화(10 μGal)를 통계적으로 유의미하게 감지할 수 있는 수준이다. 지하수의 유출·유입의 순환 패턴이 확인되었으며, 최대 22 μGal 수준의 중력 변화가 관측되었다. 이러한 변화는 증발산량 추정치를 보정하여

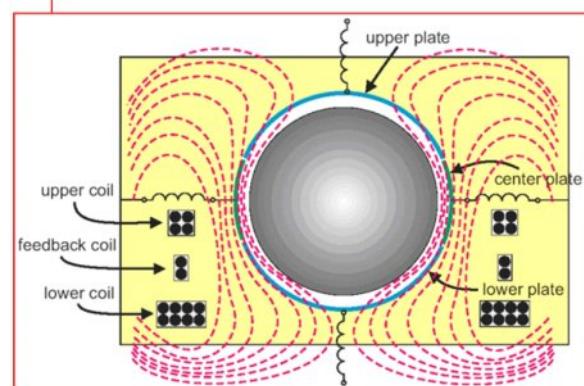
대수층의 물 수지 분석을 향상시키는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 공간적으로 중력 변화가 뚜렷이 구분되었는데, 이는 카르스트 대수층의 지하수 부존 특성이 지역적으로 다른지를 보여준다. 연구진은 지형·지질 조건을 고려하여 주요 지하수 부존 영역을 설명하고, 연구 대상 대수층의 지하수 부존 특성을 논의하였다.

2.1.3. 초전도중력계

초전도중력계는 상대중력계의 일종이지만 전통적인 스프링(zero-length spring) 방식 대신 초전도체의 자기부



Sectional drawing of Gravity Sensing Unit (GSU)



Conceptual drawing of flux lines, plates and Nb sphere

Fig. 3. Schematic diagram of the structure and basic operating principle of the superconducting gravimeter (iGravTM)(GWR Instruments, 2011).

상력을 이용하여 질량을 부유시킴으로써 극한의 정밀도를 달성한 장비이다(Prothero and Goodkind, 1968). 부피가 커서 일반 상대중력계와 달리 이동형 관측 장비로는 활용에 제한이 있으나, 고정밀의 연속 관측이 가능하다는 장점이

있어 장기 모니터링에 적합하다. 초전도중력계 내부에는 액체 헬륨으로 냉각된 초전도 재료(예: 나오븀)로 만든 구체가 있으며, 이 구체가 외부 중력장의 변화에 따라 미세하게 움직이는 것을 주변 코일 전류로 감지하여 중력

Table 1. Hydrological Application Studies Using Data from Superconducting Gravimeter (SG) Observatories in South Korea and Abroad

Location	Institution (Country)	Sensor	Purpose & Output
Mungyeong SG Observatory, South Korea	Sejong Univ., KIGAM (South Korea)	GWR OSG-045	<ul style="list-style-type: none"> The first continuous SG observation in South Korea, began in 2005 and ended in 2009. Research focused on Earth tides and crustal deformation, and gravity data were analyzed with corrections for atmospheric pressure and groundwater. The reliability of the gravity data was verified through comparison with GRACE satellite gravity measurements. These efforts enabled the detection of groundwater variation signals and the establishment of a national standard for gravity data in Korea.
Wettzell Observatory, Germany	BKG ¹⁾ -GFZ ²⁾ (Germany)	GWR OSG, iGrav, Absolute Gravimeter	<ul style="list-style-type: none"> A globally recognized core site for geodesy, Wettzell Observatory, conducts continuous gravity observations to track groundwater and soil moisture variations and to validate satellite gravity data (GRACE). Research on Earth tides and polar motion is also conducted. Gravity data are further utilized to calibrate regional hydrological models.
Membach Observatory, Belgium	ROB ³⁾ (Belgium)	GWR C021	<ul style="list-style-type: none"> With over 22 years of continuous operation, Membach Observatory holds the world's longest record for SG monitoring. It enables long-term observation of storm surge loading, groundwater fluctuations, and tidal signals. Hydrological applications include detecting gravity decreases due to soil moisture loss (e.g., during European drought in 2003).
Barton Springs, USA	BEG ⁴⁾ , Univ. of Texas at Austin (USA)	portable SG	<ul style="list-style-type: none"> A six-month deployment experiment of a SG was conducted at a karst aquifer site to verify unmanned operation and field applicability. Results showed that, in the absence of groundwater level changes, gravity variations were primarily governed by atmospheric effects. During rainfall events, the potential to detect hydrological signals was demonstrated. An attempt was also made to estimate the aquifer's specific yield from gravity data, yielding a value of approximately 0.26.
AGGO ⁵⁾ Observatory, Argentina	BKG-Conicet ⁶⁾ (Germany-Argentina)	GWR OSG	<ul style="list-style-type: none"> The only integrated geodetic observatory in South America since 2015, AGGO provides a foundation for studying large-scale hydrological variations in the Southern Hemisphere using continuous gravity data. It contributes to the International Terrestrial Reference Frame(ITRF) and supports the calibration of GRACE satellite data. The site offers long-term monitoring potential for groundwater changes across the South American plains.
ENIGMA ⁷⁾ Network, East-Asia	NIMS-NGII-KISTI (South Korea), Uinv. Tokyo/Kyoto Univ. (Japan), APM CAS ⁸⁾ (China), NYMCTU ⁹⁾ (Taiwan)	GWR iGrav, OSG etc (10 SGs in East-Asian Countries)	<ul style="list-style-type: none"> Since the 2020s, efforts have been underway to establish a SG data hub for East Asia. The goal is to enable early detection of earthquakes in East-Asian countries and monitor groundwater changes through real-time gravity data sharing. This international collaboration is expected to enhance regional studies of hydrological and geophysical phenomena and promote scientific information exchange.

¹⁾Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (Federal Agency for Cartography and Geodesy), ²⁾GeoForschungsZentrum Potsdam (German Research Centre for Geosciences), ³⁾Royal Observatory of Belgium, ⁴⁾Bureau of Economic Geology, ⁵⁾Argentine-German Geodetic Observatory; ⁶⁾National Scientific and Technical Research Council (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), ⁷⁾<https://english.cas.cn/East-Asia Superconducting Gravity Measurement Network>; ⁸⁾State Key Laboratory of Precision Geodesy, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, ⁹⁾National Yang Ming Chiao Tung University

Table 2. Observed gravity changes (μGal), water level variations, and the radius of influence (sensitive area) at each superconducting gravimeter (SG) observation site. The radius of influence refers to the horizontal distance from the SG within which approximately 90% of the subsurface water mass change contributes to the measured gravity signal—that is, the hydrological “detection footprint” of the SG

Site	Gravity Change	Sensor	Water Level Variation	Radius of Influence	Topography & Hydrological Condition
Barton Springs, Texas, USA (Wilson et al., 2012b)	~1-3 μGal	Portable SG	Small (< 0.3 m)	~0.5 km for ~50 m water depth	Karst aquifer, drought condition, strong atmospheric effects
Zugspitze, Germany (Voigt et al., 2021)	up to ~75 μGal	OSG-052	1,957 mm snow water equivalent (SWE)	Mainly within 4 km/highest sensitivity within 1 km	Alpine region, complex karst, snow/rain cycles
Mungyeong, South Korea (Kim et al., 2007)	a few μGal	OGS-045	Groundwater level fluctuations by ~1300 mm annual precipitation	~1 km	Located near the Mungyeong seismic observatory owned by KIGAM
YeMiGO, Jeongsun, South Korea (Dehghan et al., 2025)	sub- μGal	iGrav-001	Not considered, assuming minimal variations in the saturated URL	~10 km	Underground Research Laboratory (URL) at 118 m below the mean sea level, ultra-low noise
Wettzell, Germany (Creutzfeldt et al., 2008)	~19 μGal	OSG-029, 030	Water storage change in ~0.3 – 0.4 m equivalent water height	~1 km	Core site for geodesy, Earth tides, hydrology, and GRACE calibration
Membach, Belgium (Van Camp et al., 2021)	~4 μGal	C-021	Infiltration from major rain events	~0.5 km	Drought detection, storm surge tracking, long-term signals
AGGO, Argentina (Pendiuk et al., 2023)	~5-10 μGal	OSG-038	~1 m seasonal variation in groundwater level	~0.3 – 0.5 km	Geodetic integration, GRACE calibration, ITRF contribution

변화량을 측정한다(Fig. 3). 스프링 중력계와 달리 기계적 히스테리시스나 비선형성이 적어 장기간에도 안정적인 거동을 보이며, 이론적으로 $0.1 \mu\text{Gal}$ 이하의 중력 변화까지 검출 가능하다(Goodkind, 1999; Hinderer et al., 2007). Goodkind(1999)의 초전도중력계 성능 분석에 따르면, 지각 조석이나 자유 진동과 같은 매우 미약한 중력 신호까지도 잡음 수준에서 분리될 만큼 뛰어난 해상도를 보인다. 이러한 초고감도 특성을 통해 지구조석, 극이동, 대기나 해양 하중 변화뿐만 아니라 지하수 변동과 같은 수문학적 신호는 물론 지반 심부의 질량 이동에 의한 변화를 포착할 수 있다. 또한 초전도중력계는 시간에 따른 변화를 자동으로 연속 기록할 수 있기 때문에, 설계 디자인에 따라서 1초 이하 간격의 중력 변화도 포착할 수 있으며 수년 이상의 장기 관측에도 적용 가능하다(Hinderer et al., 2007). 초전도중력계의 국내외 활용사례는 Table 1 및 Table 2와 같으며, 일부는 3절과 4절에 자세히 소개하였다.

2.2. 초전도중력계를 이용한 지하수 변화 감지 원리

초전도중력계는 1990년대 이후 지구조석, 지각 운동, 지각 밀도 변화 탐지 등의 분야에 활용되어 왔다(Hinderer et al., 2007). 세계중력계망(GGP: Global Geodynamics Project)을 통해 전 세계 수십여 대의 초전도중력계가 학술 연구 목

적으로 운영되고 있으며, 이를 자료는 지구의 장기 중력 변동 연구에 공헌해왔다(Crossley and Hinderer, 2009). 지하수 연구 분야에서는 초전도중력계를 수문학적 센서로 활용하려는 시도가 비교적 최근에 나타났으며, 이는 장기간에 걸친 연속 중력자료로부터 강우 함양으로 인한 지하수위 변동에 기인한 중력 신호를 분리하고자 하는 노력에서 시작하였다(Wilson et al., 2012b; Voigt et al., 2021).

다른 중력계들과 비교할 때 초전도중력계의 최대 장점은 장기적인 드리프트가 매우 작다는 점이다. 정밀 제작된 초전도중력계의 경우 월 단위 드리프트가 약 $0.1 \mu\text{Gal}$ 수준으로 연간 누적도 몇 μGal 정도에 불과하며(Hinderer et al., 2007), 이는 중력자료의 연간 변화 추이에 대한 신뢰도를 높여준다. 물론 잔여 드리프트 보정을 위해 정기적인 절대중력계 교정이 병행되기도 하지만, 이러한 안정성 덕분에 초전도중력계는 지하수처럼 완만한 속도의 장기적인 질량 변화를 탐지하는 데 이상적인 도구로 평가된다.

중력 기반의 지하수 탐지 원리는 질량-중력 불변의 법칙에 기초한다. 지하 대수층에 물이 채워지거나 빠져나가면 해당 지역의 질량이 변하여, 그 바로 위 지표면에서 측정되는 중력가속도에 미세한 변화를 유발한다. 단순 모델로써 무한 평평 형태의 균질 대수층을 가정하면, 수위가 상승할 때 중력은 증가하고 수위가 하강하면 중력은 감소하며,

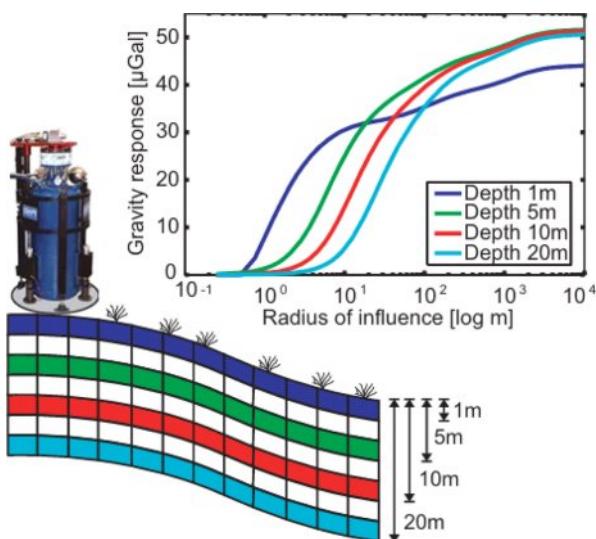


Fig. 4. Gravity response due to a 1-meter-thick water change in a layer distributed along the topography. The radius of this layer is progressively increased to investigate the radius of influence. The effect of different water storage, like soil moisture or groundwater, is simulated by moving this layer into different depths (GWR Instruments, 2010).

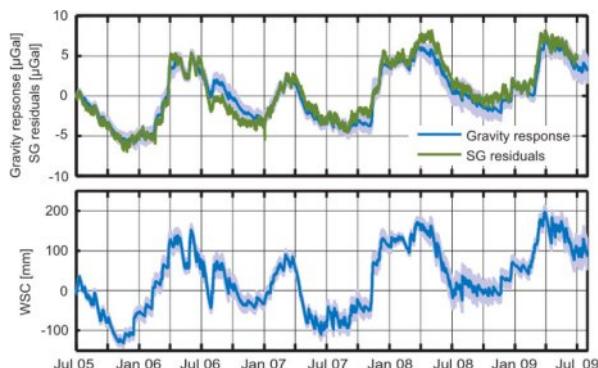


Fig. 5. Time series of measured superconducting gravimeter (SG) residuals. (top) the modeled hydrological gravity response, (bottom) the corresponding modeled water storage changes (GWR Instruments, 2010).

수위가 10 cm 변화할 때마다 대략 0.84 μGal 수준의 중력 변화를 유발할 수 있다(식 (1)). Fig. 4는 1 m 두께의 지하수(또는 토양수분) 질량 변화에 따른 수십 μGal 수준의 중력 반응을 보여준다. 따라서 지하수위 변화에 의한 중력의 증감 신호는 초전도중력계의 분해능 범위 안에 있으며, 충분히 보정한 잔차 중력에서 장주기의 중력 변화로 검출될 수 있다(Fig. 5). 이러한 개념은 수리지질학 분야에서 중력 관측을 원격 수문센서로 활용하는 연구로 이어지고 있다. 중력자료를 통해 대수층의 유효공극률 또는 비산출률을 역산하거나, 강우에 따른 지하 침투량을 추정 및

대수층 저류량의 계절 변동을 정량화하는 등에도 응용이 가능하다.

2.3. 지하수 변화 감지를 위한 초전도중력 측정자료 분석 및 보정

초전도중력계 측정신호에는 대상 지역의 전체 질량변화에 따른 중력변화가 모두 합쳐져 나타나므로, 지하수 효과를 해석하려면 아래와 같은 여러 물리적 요인의 영향을 보정하거나 분리해야 한다.

$$g_{obs} = g_{res} + g_{tide} + g_{ol} + g_{ap} + g_{polar} + g_{disp} + g_{hyd} \quad (2)$$

여기에서 g_{obs} 는 관측된 중력값, g_{res} 는 잔차 중력, g_{tide} 는 지구조석(earth tide) 효과에 의한 중력변화, g_{ol} 는 해양조석하중(ocean tide loading)에 의한 중력변화, g_{ap} 는 국소 대기압 변화(atmospheric pressure) 효과, g_{polar} 는 극이동(polar motion) 효과, g_{disp} 는 지반수직변위(ground vertical displacement)에 의한 효과, g_{hyd} 는 수문학적 효과(hydrological effect)에 의한 중력효과이다.

전 지구적 요인인 지구조석에 의한 중력변화(g_{tide})는 수 μGal 수준으로서 시계열 중력의 변화에서 가장 크게 나타나므로, 보정이 필수적이다. 또한 매 4시간마다 변하기 때문에 이 영향을 제거하는 것이 매우 중요한데, 다행히 표준 조석 모델을 이용하여 쉽게 제거할 수 있다. 둘째, 대기압 변화(g_{ap})는 중력에 직접적인 부하 효과를 주며 대략 1 hPa 기압 변화당 0.3 μGal 정도의 중력 변화를 유발한다. 따라서 현장 기압계를 이용한 동시 관측자료를 이용하여 중력 데이터에 기압 보정을 시행해야 한다(Wilson et al., 2012b). 셋째, 해안이나 섬 지역의 경우 해양 하중에 의한 중력 변화(g_{ol})도 무시할 수 없는데, 이는 인근 해양의 조석 상승에 따른 질량 부하가 지각을 휘게 하고 중력에 변화를 주는 효과다. 이러한 해양 하중 효과는 해안에서 수십 km 내지는 수백 km 거리까지 영향을 줄 수 있으며, 해양 조석 모델로 계산하여 보정할 수 있다. 넷째, 극이동에 따른 중력 변화(g_{polar})도 연간 주기로 수 μGal 발생하므로, IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service)에서 제공하는 극이동 파라미터를 이용해 보정한다. 마지막으로, 계기 드리프트(기계적 오차)는 초전도중력계의 경우 매우 작지만(연 수 μGal 이하) 완전히 배제할 수는 없으므로, 일정 간격으로 절대중력계 측정을 병행하거나 관측자료의 장기 추세를 제거하는 방식으로 교정한다(Van Camp et al., 2017).

위의 보정 과정을 거쳐 얻어진 잔차 중력에는 수문학적 신호가 포함되어 있게 된다(Voigt et al., 2021). 하지만 지

하수, 토양수분, 눈 등 다양한 수문 요소가 중첩되어 있을 수 있으므로, 추가적인 자료 분석을 통해 관심 요소를 분리하는 작업이 필요하다. 예를 들어 독일 Zugspitze 연구에서는 잔차 중력에 포함된 눈 적설의 기여를 분리하기 위해 강설-적설 관측망(snow water equivalent(SWE) 측정 장비) 자료를 활용하였다(Voigt et al., 2021). 적설 분포를 기반으로 등가 질량판 모델(Equivalent mass sheet model)을 적용하여 눈으로 인한 중력 효과를 이론적으로 계산하여 잔차 중력과 비교함으로써, 잔차 신호 중 눈에 의한 부분을 확인하고 나머지를 지하수 신호로 할당할 수 있었다. 이와 유사하게 지하수위 관측망이 있을 경우, 수위 변화를 이용해 중력 신호를 해석할 수 있다. 실제로 카르스트 대수층이 발달한 지역에서는 강우 후 중력 증가 신호가 토양수 포화로 인한 일시적 효과인지, 대수층 깊은 곳까지 험양된 영구적 저장 증가인지를 판별하기 위해 다중 관측 공의 수위 상승 패턴과 중력 신호를 비교 분석하기도 하였다(Kim et al., 2007; Voigt et al., 2021).

다양한 수문 요소가 겹친 중력 신호를 정확히 이해하기 위해 전산 모형을 이용한 수치모델링과 역산 해석이 병행 되기도 한다. Van Camp et al.(2006)는 지하수 분포와 지질구조를 고려한 3차원 밀도 모델을 구성한 뒤, 지하수위 자료나 강우-함양 정보를 해당 모델에 적용하여 예상되는 중력 변화를 계산하고 실제 관측 중력 신호와 비교하였다. 이와 같은 모델링 기법은 중력 신호의 원인을 추론하는 데 도움을 주며, 필요한 경우 중력자료로부터 역으로 지하수 변화의 공간 분포를 추정하는 데 활용될 수도 있다. 다만 중력 역산은 유일한 해가 존재하지 않는 비단일해(non-uniqueness) 문제가 있어 부가적인 제약조건이나 다른 관측의 도움 없이는 난해하므로, 주로 시나리오 분석이나 데이터 융합(data fusion) 기법의 매팩에서 활용된다.

요약하면, 초전도중력계를 이용한 지하수 탐지 연구에서는 다음과 같은 자료 보정 및 분석 단계를 거친다:

- 기본 중력 보정: 지구조석, 대기압, 해양 하중, 극이동, 기기 드리프트 등의 영향 제거
- 수문 보조자료 활용: 강수량, 적설량, 지하수위, 토양 수분 등의 현장 자료와 잔차 중력 비교
- 모델 기반 해석: 지하수-토양수 모형을 활용한 중력 변화 예측과 측정값의 대조
- 잔차 신호 해석: 남은 잔차 중력으로부터 지하수 저장량 변화를 정량화

이러한 체계적인 접근을 통해 초전도중력계 자료로부터 순수한 지하수 신호를 추출하고 해석할 수 있다.

2.4. 하이브리드 중력(hybrid gravimetry) 관측 기법

하이브리드 중력 관측 기법은 초전도중력계(고정점 고정밀 연속관측)와 절대중력계·상대중력계(이동식 간헐 관측)의 장점을 결합하는 방법으로, 지하수 모니터링뿐 아니라 지각 밀도 변화, 지진 전조 텁지 등 다양한 중력 응용 연구에 활용되고 있다. 초전도중력계는 한 지점에서 연속적으로 상대중력 변화를 높은 정밀도로 제공하지만, 절대적인 중력값의 기준이나 공간 분포 정보는 제공하지 않는다. 이를 보완하기 위해 절대중력계로 일정 간격으로 현장을 방문하여 초전도중력계의 눈금을 보정하고 드리프트를 추정한다. 또한, 이동형 상대중력계도 중요하게 병행 활용된다. 스프링식(예: LaCoste-Romberg, Burris)이나 석영진동자식을 이용하는 이동형 중력계(예: Scintrex CG-5, CG-6)는 한 지점에서 다른 지점으로 이동하며 상대적인 중력을 측정할 수 있어, 공간적인 중력 분포지도를 작성하거나 특정 지역의 중력 이상 변화를 파악하는 데 이용된다. 이동식 관측으로 얻은 지역 중력 분포 데이터와 초전도중력계의 시간변화 데이터를 결합하면, 시·공간적으로 연속된 중력 변화를 추적할 수 있다. 또한, 이러한 방법을 통해 지하수 변화의 3차원 분포 특성 및 시간 변화를 더욱 정밀하게 해석할 수 있을 것으로 기대된다.

나아가 초전도중력계 자료와 위성중력 자료를 결합하여 서로 검증 및 보완할 수 있다. 예를 들어, 경북 문경 초전도 중력관측소에서는 중력자료에서 기계적 잡음을 제거한 후 현장 기압 및 지하수위 자료를 이용해 보정함으로써 중력 신호의 신뢰도를 높인 후 이를 GRACE 위성중력 자료와 비교한 결과, 약 0.63의 상관관계를 확인하였다 (Kim et al., 2007). 이 결과는 지상 초전도중력계가 광역의 위성중력 변화와 일치하는 경향을 보임을 확인한 것으로, 지상 중력관측이 위성 관측의 지역적 보완 수단이 될 수 있음을 시사한다. 그러나, 이러한 접근을 지하수 연구에 적용하기 위해서는 몇 가지 기술적 제약이 존재 한다. 우선 지하수 변동 신호와 중첩되어 나타나는 다양한 외부 요인들(예: 지구조석, 대기압, 해양 하중 등)을 얼마나 정밀하게 제거할 수 있는지가 관건이며, 또한 고정된 중력값을 기반으로 산정한 지하수 함양 및 유출량이 입력 변수(예: 수위, 공극률)의 불확실성에 얼마나 민감하게 반응하는지를 평가하는 것이 중요하다. 이러한 요인들로 인해 실제 적용에는 반복적인 교정과 검증 과정이 수반되어야 할 것으로 판단된다.

3. 초전도중력계를 활용한 지하수 모니터링 해외사례

국내외 주요 초전도관측소에서 중력 데이터를 수문학적 연구에 응용한 현황을 요약하면 Table 1 및 Table 2와 같다.

3.1. 카르스트 대수층 지하수 모니터링(미국 텍사스)

지하수 변화를 탐지하기 위해 야외 환경에 초전도중력계를 설치한 선구적인 사례로, Wilson et al.(2012b)이 수행한 텍사스 카르스트 대수층 실험이 있다. 이 연구에서는 이동형 초전도중력계(Transportable Superconducting Gravimeter; TSG)를 개발하여 미국 텍사스 중부 Edwards 대수층의 함양 지역에 위치한 관측정 인근에 설치하고 약 6개월간 중력을 연속 관측하였다. 관측 기간 동안 지하수위는 0.3 m 미만의 비교적 작은 변동을 보였는데, 이는 연구 기간이 가뭄 상태여서 대수층의 저장량 변화가 크지 않았기 때문이다. 그 결과, 중력 변화량은 약 3 μGal 에 불과했으며, 이는 계측 한계에 근접한 수준이었다. 또한 기압 변화가 중력에 미친 영향이 지하수 신호보다 훨씬 크게 나타났는데, 이는 대기압 변화가 지하수위에도 영향을 주어 지하수위와 중력 모두에 교란 요인으로 작용했기 때문이다.

연구진은 중력자료에서 기압에 의한 중력 영향을 제거하고 남은 잔차를 지하수 기여로 해석하여, 지하수위 변화와 비교 분석을 수행하였다. 관측된 중력 감소량 대비 지하수위 하강량을 통해 대상 지층의 유효공극률을 약 0.26 정도로 추정하였는데, 이는 기존 문헌에서 보고된 값보다 다소 큰 수치였다. 저주파 신호 위주의 분석에 따른 불확실성에서 기인한 것으로 해석하였다. 본 연구를 통해 야외 무인 환경에서 초전도중력계를 활용할 수 있는 가능성을 검증하였으며, 향후 강우가 충분한 기간이나 수문변동이 뚜렷한 상황에서 초전도중력계를 적용하면 유의미한 지하수 저장 변화를 중력 신호에서 측정할 수 있을 것이라고 결론지었다.

3.2. 알파인 고산지대의 수문 변화 관측(독일 Zugspitze 지역)

독일 남부 Zugspitze 산악 지역에서는 초전도중력계를 강설 및 지하수 변화 감지용 수문학 센서로 도입하였다 (Voigt et al., 2021). 연구 지역은 연평균 강수량이 2,000 mm 가 넘고, 최대 9개월간 지속적으로 눈에 덮혀 있는 알프스 고산지대로, 복잡한 카르스트 지질구조를 통해 용설 및 강우에 따른 지하수 함양이 이루어지는 곳이다. 독일 지구

과학연구센터(GFZ)에서는 2018년 말 해당 유역의 지표에 초전도중력계(OSG-052)를 설치하고 2년 이상 연속 관측을 수행하였다.

얻어진 중력 시계열 자료에서 조석, 기압, 극이동 등의 표준 보정을 거쳐 잔차 중력을 추출한 결과, 계절적인 중력 변동 폭이 최대 약 75 μGal 에 이르는 것으로 확인되었다. 이 신호는 주로 겨울철 적설과 봄철 용설에 따른 지상 수문 질량 변화로 해석되었다. 실제 이는 2019년 5월 말, 해발 고도 2,420 m에서 눈 측정 장비(snow scale)로 확인된 눈 수분 당량(snow water equivalent) 1,957 mm에 해당한다. 이는 초전도중력계가 대기 강설로 인한 지표 부하 변화까지 정밀하게 포착했음을 보여준다. 한편, 여름과 가을 동안에는 전류 중력이 서서히 감소하였는데, 이는 눈이 모두 녹은 후 카르스트 대수층으로의 함양이 줄어들고 용천(spring) 유출이 지속되면서 지하수 저장량이 서서히 감소한 결과로 해석되었다. 특히 가을철에 관측된 최소 중력값들은 인근 용천의 유량 감소와 지하수위 저하와 밀접한 상관성을 보여, 초전도중력계 데이터에서 카르스트 대수층 내 지하수의 계절적 고갈 효과를 확인할 수 있었다.

연구진은 이 지역에서 중력 변화의 약 2/3 정도가 적설에 의한 것이고 나머지 1/3 가량은 지하수(카르스트 대수층) 부존량 변화에 기인한다고 추정하였다. 추가적으로, 다양한 공간 범위의 질량 변화 시나리오에 대한 민감도 해석을 통해 초전도중력계가 대략 반경 4 km 이내의 수문 질량 변화를 주로 반영하며, 그 중에서도 관측지와 가까운 수 km 이내의 변화에 가장 민감하다는 것을 밝혔다. 이러한 결과는 초전도중력계를 활용하여 고산지역의 종합적인 수문질량 수지(눈, 토양수, 지하수의 총변화)를 모니터링 할 수 있음을 보여주며, 수문 모델링과 중력자료의 결합을 통해 지하수 함양 및 유출 과정을 더욱 잘 이해할 수 있음을 시사한다.

3.3. 기타 지역에서의 연구

초전도중력계를 이용한 지하수 및 수문 변화 연구는 점차 늘어나고 있는 추세이다. 유럽에서는 독일 Wettzell 관측소와 Moxa 관측소의 초전도중력계 자료를 활용하여 강우에 따른 국지적인 토양수 및 지하수 변화 신호를 분석하는 연구들이 진행되었다. Van Camp et al.(2017)은 초전도중력계를 활용한 연구 사례를 여럿 소개하고 있는데, 소개된 연구 중 Van Camp et al.(2006)은 벨기에 Membach 관측소 인근의 강우-유출 모델과 포화대-불포화대 통합 모델을 구축하고, 이를 통해 추정된 국지 수문질량 변화를 중력 측정값에서 제거함으로써 중력자료에 내재한 지하수

신호를 정량적으로 평가하였다. 이러한 접근은 지하수 변화 자체를 파악하는 동시에, 중력계를 이용한 지구역학현상(Geodynamic Process) 연구(예: 맨틀 대류나 지각 변형 연구)에 있어서 수문 잡음을 제거하는 이점도 제공한다. 또한 아프리카 베냉의 Djougou 지역에서는 GHYRAF (Gravity and Hydrology in Africa) 프로젝트의 일환으로 초전도중력계를 설치하여 열대 기후 조건에서의 지하수 및 토양수분 변화 모니터링을 시도하였다(Hinderer et al., 2009). 이처럼 다양한 기후와 지질 조건에서 축적된 연구들은 초전도중력계의 수문학적 활용 가능성을 입증하고 있으며, 다른 한편으로는 향후 개선해야 할 과제들도 제시하고 있다. 예를 들어, 중력 신호는 여러 원인이 겹쳐 나타나므로 눈, 토양수, 지하수, 지표수의 영향 분리가 중요한데, 이를 위해서는 다각도의 현장 관측과 보정기법이 필요하다(Van Camp et al., 2017; Voigt et al., 2021).

마지막으로, 지하수 변화 탐지를 위한 중력 기법은 초전도중력계뿐만 아니라 위성중력(GRACE 위성)이나 이동식 절대중력계 등을 함께 이용하는 하이브리드 중력 관측으로 확장되는 추세이다. 전 지구 수준에서는 위성중력으로 대규모 대수층 변화 추세를 파악할 수 있고(Rodell et al., 2009), 지역 수준에서는 초전도중력계가 세밀한 변화를 감지하며, 국지적으로는 지상 중력측량이나 관측정 관측으로 상세 분포를 분석하는 식으로 다중 규모 중력

모니터링 체계가 구축되어 가고 있다(Van Camp et al., 2017). 우리나라에서도 지하수 관측정 주변에서 초전도중력계의 연속측정자료와 위성중력의 연속측정자료를 비교하는 연구를 시도해 볼 수 있겠으나, 위성중력의 저해상도를 고려할 때, 장기 관측자료가 비교되어야 할 것으로 판단된다.

4. 국내 초전도중력계 연구사례

4.1. 문경 초전도중력관측소

우리나라에서는 2005년 경상북도 문경시에 국내 최초의 초전도중력관측소가 설치되어 운영되었으며(Kim et al., 2007), 2009년 가동이 중단되었다(Fig. 6). 문경 초전도중력계(OSG-045)는 2005년 3월 가동을 시작하여 GGP의 21번째 관측소로 등록되었으며, 지구조석, 극이동, 지진, 수문 변화 등 여러 분야 연구에 활용되었다. 해당 관측소는 지하 암반에 플랫폼을 고정하고 상부 지표에 초전도중력계를 올려 지표 진동을 분리하였고, 연속 운영을 통해 고품질의 중력 시계열 데이터를 측정하였다. 설치 직후부터 약 1년간의 자료를 분석한 결과, 조석 신호를 정밀하게 추출하고 지진파를 기록하는 등 관측 성능이 입증되었다. 이 과정에서 중력자료의 정확도를 높이기 위해 현지 기압변화와 지하수위 변동을 보정하였으며, 조석모델 및



Fig. 6. Superconducting gravimeter installed and operated by Sejong University and KIGAM at the Mungyeong seismic observatory.

해양 하중 모델을 적용하여 비중력(非重力) 신호를 제거하였다. 문경 관측 자료는 한반도 내륙의 장주기 중력변화를 대표하는 기준으로서 가치가 높으며, 위성중력 자료의 검증 등 다양한 연구에 활용되었다.

문경 관측소 인근에는 지하수 관측정이 함께 설치되어 있어 지하수위 변화를 실시간 모니터링하고 중력 신호 해석에 활용하였다. 분석 결과에 따르면, 문경 지역의 잔차 중력 이상(residual gravity anomaly)에서 강우에 따른 지하수위 상승 시 중력이 증가하고, 가뭄 시 중력이 서서히 감소하는 경향이 관측되었다. 이는 초전도중력계를 통해 국내에서도 지하수 질량 변화 신호를 탐지할 수 있음을 보여주는 결과이다. 다만 문경 초전도중력계의 주 활용 목적은 지각 조석 및 지각변동 연구였기 때문에, 수문학 연구는 제한적으로 수행되었다.

4.2. 예미 미세중력관측소와 세종 우주측지센터

2022년 강원도 정선군에 예미 미세중력관측소(YeMiGO)가 신규 구축되어 현재까지 운영되고 있다(Fig. 7). 예미 관측소는 지하 1,008 m(해발 -118 m) 심도에 구축된 지하실험 시설인 예미랩(Park et al., 2024)의 초저잡음 환경하에서 초전도중력계(iGrav001), 지진계, 가속도계 등으로 미세중력 변화를 관측하는 국가기반 시설이다(Dehghan et al., 2025). 이곳에서는 차세대 초전도 중력경사계 개발과 더불어, 지하수 변동에 따른 미세중력 변화 및 보정을 통한 중력 잔차를 계산하고 분석하여 지진 조기탐지 연구에 활용하는 계획이 진행되고 있다.

아울러 2024년 국토지리정보원의 세종 우주측지센터에도 VLBI (Very Large Baseline Interferometry)의 보정을 위한 초전도중력계(iGrav055) 기지가 설치되어 중력측정을

수행하고 있다. 향후 예미와 세종의 두 곳의 관측 자료를 비교하면, 국지적인 수문신호와 광역적인 지각신호를 분리하는 데 도움이 될 것으로 기대된다. 또한 국내 중력계 교정 및 데이터 허브 구축을 위한 노력이 국가수리과학연구소(NIMS), 국토지리정보원(NGII), 한국과학기술정보연구원(KISTI), 한국표준과학연구원(KRISS) 등에 의해 공동으로 진행되고 있다.

4.3. 동아시아 중력 관측 네트워크 (ENIGMA)

국내 연구진은 동아시아 지역의 중력 관측 협력을 강화하기 위해 ENIGMA (East-Asian Network Initiative for Gravity Measurement Alliance) 구성을 주도하고 있다(Fig. 8). ENIGMA는 동아시아의 미세중력 관측망을 구축하고 데이터 허브를 마련하기 위한 국제 협력 이니셔티브로, 한국, 일본, 중국, 대만의 관련 기관들이 참여하고 있다. 2025년 현재, ENIGMA에는 한국의 국가수리과학연구소(NIMS), 국토지리정보원(NGII), 한국과학기술정보연구원(KISTI), 일본의 도쿄대, 교토대, 중국의 중국과학원, 대만의 양명 교통대, 캐나다의 캘거리대 등이 참여하고 있다. 이 네트워크의 목표는 동아시아 지역에 산재한 초전도중력계 관측소와 신규 설치 지점을 연결하여 초전도중력계 데이터 허브를 구축하고, 이를 통해 지진, 화산, 수문 변화 등의 질량 이동 현상을 실시간 모니터링하는 것이다. 특히 한반도와 인접한 일본과 중국은 각각 수 개의 초전도중력계를 이미 운용 중이며(일본 미즈사와, 도후쿠, 카미오카 등; 중국 우한, 리징, 라사, 쿤밍 등), 여기에 한국과 대만의 관측점을 연계하면 지역 규모에서의 중력 변화를 상세히 추적할 수 있을 것으로 기대된다.

수문학적 관심사 관점에서 ENIGMA의 과학적 의의 중

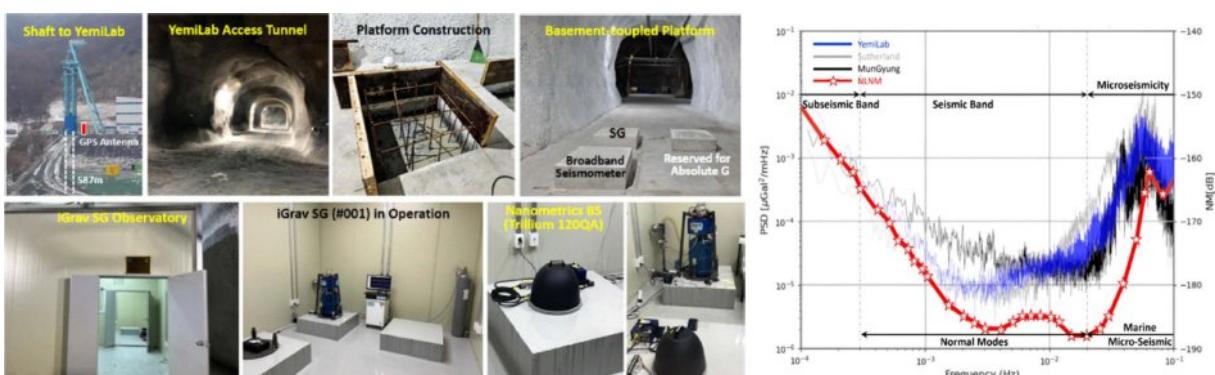


Fig. 7. Superconducting gravimeters (SGs) installed in South Korea. (**left**) SG by NIMS and University of Calgary and triaxial broadband seismometer by Kyoto University installed at the Yemi Micro-Gravity Observatory (YeMiGO, Jeongsun, Kangwon Province), (**right**) Comparison of noise power spectra of the Yemi iGrav [blue], Mungyeong SG [black], and Strasbourg SG [gray] (Modified from Dehghan et al. (2025)).



Fig. 8. ENIGMA (East-Asian Network Initiative for Gravity Measurement Alliance): An international collaboration for gravity measurement in East Asia, consisting of the National Institute for Mathematical Sciences (NIMS), National Geographic Information Institute (NGII), Korea Institute of Science and Technology Information (KISTI), University of Tokyo, Kyoto University, National Yang Ming Chiao Tung University, Chinese Academy of Sciences, and University of Calgary. The network includes over 10 superconducting gravimeter stations across East Asia, with an integrated data hub center established at KISTI (Son et al. (2024)).

하나는 대륙 규모의 지하수 변화에 초점을 맞추어 중력 관측 데이터를 공유하는 데 있다. 동아시아는 몬순 기후 영향으로 강우 변동성이 큰 지역이므로, 해마다 지하수 함양과 가뭄이 교대로 발생한다. 이러한 광역 수문 사이클을 중력망으로 관측하면 인공위성의 대규모(저해상도; 수십~수백 km 수준) 자료보다 상세한(cm~m 단위) 지역 정보를 얻을 수 있으며, 국가 간 수자원 변동을 공동으로 연구하는 기반이 될 수 있다. 또한 ENIGMA를 통해 확보된 고해상도 중력 데이터는 지진 발생 시의 질량 이동(예: 거대 지진 시 지각 변형으로 인한 중력 변화)을 포착하거나, 화산 분화 전 마그마 상승으로 인한 중력 이상을 탐지하는 등 재난 예방 연구에도 활용될 전망이다.

한국은 ENIGMA 구성을 위해 2023년부터 예비 연구를 진행하고 있으며, 참여기관 간에 데이터 공유 및 인력 교류를 추진하고 있다. 예를 들어 국가수리과학연구소, 한국과학기술정보연구원, 국토지리정보원은 중력자료의 표준화와 빅데이터 처리를 위한 연구협약을 진행 중이고, 일본 및 대만 연구진과 워크숍을 통해 공동 실험 계획을 논의하고 있다. ENIGMA 네트워크가 본격 가동되면 국내 세종·예미, 일본 미즈사와, 중국 우한, 대만 등의 중력 관측이 하나의 플랫폼에서 통합 분석될 수 있으며, 이는 동아시아의 지진, 지하수 등의 지구물리 연구에 새로운 장을 열 것으로 기대된다.

5. 시사점

초전도중력계를 활용한 지하수 탐지 기법은 아직 기초 연구 단계로, 초기 성과들은 그 유용성과 한계를 모두 보여 준다. 장점으로는 지하수위 변화로 인한 질량 변화량을 직접 측정함으로써 관측정을 이용한 국지 관측의 한계를 넘어선 거동 특성을 파악할 수 있다는 점을 들 수 있다 (Pool and Eychaner, 1995; Voigt et al., 2021). 대수층 전반에 걸친 평균적인 저장량 증감을 중력으로 감지함으로써, 개별 관정의 수위 기록으로 추정하기 어려운 지역 전체의 물 수지를 산출할 수 있다. 이는 대수층의 거동이 공간적으로 불균질한 경우 특히 중요하게 된다(Kim et al., 2007). 예를 들면, 카르스트 지대와 같이 지하수가 공동을 따라 빠르게 유동하고 지역 간 수위 변동이 상이한 환경에서, 중력 측정은 공간적 평균 효과를 제공하여 전체 시스템의 물 수지 변화를 평가하는 데 유용한 정보를 제공한다(Kim et al., 2007; Voigt et al., 2021). 이는 중력 자료가 수직 분포 정보를 제공하지는 않지만, 수평적으로 통합된 감지 효과를 통해 전체 시스템의 동시 변화를 반영하기 때문이다. 또한, 중력계는 지하수 함양과 유출, 저장량 회복 등의 변화를 질량 변화로 직접 감지할 수 있기 때문에, 절대중력계와 병행하여 사용할 경우, 초전도중력계는 고정밀 지속 관측을, 절대중력계는 보정 기준을 제공함으로써, 지하수 고갈,

인공 함양 등의 영향을 모니터링하는데 필요한 장기 변동 추적 및 단기 사건 분석을 동시에 수행할 수 있다는 장점이 있다(Chen et al., 2021, 2023).

이러한 장점을 고려할 때, 국내에서는 제주도 지하수의 지속 가능성 확보를 위해 초전도중력계를 활용한 지하수 모니터링을 고려해 볼 수 있다. 제주도는 지하수 의존도가 매우 높은 화산섬으로, 다공성과 투수성이 큰 현무암 기반의 화산암과 균열이 많은 다층 구조로 이루어져 있다. 연평균 1,800~2,200 mm에 달하는 풍부한 강수량은 여름 철에 집중되며, 지표 유출 없이 대부분 지하로 침투한다. 오랜 화산활동으로 형성된 불균질한 지하 지질구조로 인해 지역별 수위 분포 및 변화 양상은 복잡하다. 이로 인해 수문 모형의 불확실성이 크므로, 양수나 함양 시 지하수 저장량의 변화를 직접 측정할 수 있는 초전도중력계를 활용하여 장기 모니터링을 할 필요가 있다. 특히, 양수에 의해 단기간에 급격한 수위 변동이 발생하는 지역이나 가뭄에 의해 장기적인 지하수위 하강 패턴이 나타나는 지역에서 초전도중력계를 이용한 지하수 모니터링의 효과가 클 것으로 기대된다. 아울러 초전도중력계의 모니터링 자료는 지하수 부존량 평가뿐만 아니라 지진이나 화산 활동 감지에도 활용될 수 있다는 장점이 있다.

반면 중력 신호는 여러 수문학적 프로세스의 합으로 나타나기 때문에 원인 분해가 어렵다는 한계점이 있다. 앞서 설명한 바와 같이, 강우 직후 중력 증분이 관측되었다면 이것이 불포화대의 일시적 포화 때문인지, 지하수면 상승 때문인지, 또는 두 가지 모두가 원인인지 구분해야 한다. 이를 위해 부가적인 현장 계측이 필요하며, 충분한 자료가 없을 경우 해석에 불확실성이 따르게 된다(Wilson et al., 2012b; Voigt et al., 2021). 또한, 중력 관측만으로는 깊이에 따른 변화를 특정할 수 없다는 한계가 있다. 표층 10 cm의 토양수 증가나 10 m 깊이의 대수층 수위 상승이 중력계에 미치는 영향은 거리나 분포에 따라 달라지지만(Fig. 4), 결과적으로 중력계는 총 효과만을 측정하기 때문에, 어느 깊이에서 어느 정도의 변화가 발생했는지를 추가 정보 없이 알기 어렵다. 이러한 모호성을 줄이기 위해 수위관측 자료 및 지하수 모델링과 중력자료의 결합, 또는 다중 중력계 배열을 통한 공간분해능 향상 방안 등이 연구되고 있다(Van Camp et al., 2006, 2017).

실용적인 측면에서 초전도중력계의 높은 비용과 유지관리의 어려움도 고려해야 할 부분이다. 초전도중력계는 수억 원에 달하는 고가의 장비일 뿐 아니라, 액체헬륨 보충, 진공 유지, 전자장비의 안정화 등 전문적인 유지 보수가 요구된다. 야외 현장에 설치할 경우, 온도 변화와 전원 공급,

보안 등의 문제도 해결해야 한다(Wilson et al., 2012b). 이러한 이유로 현재까지는 초전도중력계를 지하수 모니터링 용도로 상시 운용하는 사례가 드물며, 주로 단기 실험이나 기존 지구물리 관측소에서 부가적인 연구로 수행되는 경우가 많다. 그러나 기술 발전에 따라 초전도중력계의 소형화 및 자동화가 진행되고 있고, 최근에는 양자 간섭계 기반의 새로운 중력계 개발도 이루어져 향후 현장 적용성이 개선될 전망이다. 만약 저비용의 고정밀 중력계가 보급된다면, 지하수 모니터링망에 중력 관측이 포함되어 실시간으로 대수층 저장량 변화를 경보하거나 관리에 활용하는 시대도 가능할 것이다(Van Camp et al., 2017).

요약하면, 초전도중력계를 활용한 지하수 탐지는 지하수 거동을 연구하는 데 강력한 혁신을 불러올 수 있는 기법이다. 총체적 질량 변화에 대한 직접적인 관측을 통해 기존에 어려웠던 대수층의 유효 저류 변화량을 산정할 수 있고, 나아가 수문학적 모델을 보정하거나 검증하는 데에도 활용될 수 있다(Pool and Eychaner, 1995; Voigt et al., 2021). 비록 현 단계에서는 공간해상도의 한계, 자료 해석의 복잡성, 운영비용 등의 도전과제가 존재하지만, 지속적인 연구와 기술 발전을 통해 이러한 문제들이 극복되고 있다. 특히 위성중력 자료와의 연계, 지하수 유동 모델과의 통합, 그리고 여러 센서를 활용한 디학제적 수문 모니터링체계 속에서 중력 관측이 중요한 한 축을 차지하게 될 것으로 기대된다(Rodell et al., 2009; Van Camp et al., 2017).

6. 결 론

중력측정을 활용한 지하수 연구는 지하수 자원의 변화량을 직접적인 물리량(질량)으로 추적할 수 있는 혁신적인 접근법이다. 그 중에서도 초전도중력계는 뛰어난 정밀도와 안정성을 바탕으로 지하수에 의한 미세한 중력 변동까지 포착할 수 있어, 수문학 분야의 활용 잠재력이 큰 도구로 부각되고 있다. 초전도중력계 데이터를 통해 강우-함양-유출로 이어지는 수문 순환 과정에서 지하수 저장량의 동태를 연속적으로 파악할 수 있으며, 이는 기존의 관측정 수위 모니터링만으로 얻기 어려운 통합 정보이다. 특히 카르스트 대수층이나 대규모 불투수층 분포 지역처럼 지하수 변동이 공간적으로 복잡한 경우, 중력자료는 전체 시스템의 거동을 파악하는 데 필수적인 단서를 제공할 수 있다.

초전도중력계를 활용하여 지하수 저장량 변화를 성공적으로 파악하기 위해서는 정밀한 자료 보정과 다양한 보조 관측이 수반되어야 한다. 중력 측정자료에서 지하수 신호를

분리하고 이해하기 위해 강우량, 적설량, 지하수위, 토양 수분 등 관련 인자를 함께 모니터링하고 통합 해석하는 것이 중요하다. 또한, 중력자료의 해석에는 지질학, 수문학, 지구물리학(예: GNSS/InSAR, ERI 등)의 지식이 모두 요구되므로, 학제 간 협력을 통해 모델링과 자료 해석 기법을 발전시켜 나가야 한다.

향후 초전도중력계 기술의 발전과 함께, 더 많은 지하수 탐사 연구에 초전도중력계가 활용될 것으로 기대된다. 이를 통해 지하수 자원의 변화를 조기에 탐지하고, 나아가 수자원 관리 정책 수립과 지하수 모델의 검증 등에 활용함으로써 지속 가능한 수자원 관리에 기여할 수 있을 것이다. 결론적으로, 초전도중력계를 활용한 중력 탐지는 지하수 모니터링에 있어 과학적 심층 정보를 제공하는 유망한 방법이며, 지속적인 연구를 통해 그 정확도와 활용성을 높인다면 미래의 수문학 연구 및 실무에 중요한 역할을 맡게 될 것이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업(25-3411)과 국가수리과학연구소의 주요사업(B25720000)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Chen, K.H., Hwang, C., Chang, L.C., and Ke, C.C., 2018, Short-time geodetic determination of aquifer storage coefficient in Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **123**(3), 10,987-11,015.
- Chen, K.H., Hwang, C., Chang, L.C., and Tanaka, Y., 2021, Infiltration coefficient, percolation rate and depth-dependent specific yields estimated from 1.5 years of absolute gravity observations near a recharge lake in Pingtung, Taiwan. *Journal of Hydrology*, **603**(Part C), 127089.
- Chen, K.H., Hwang, C., Chang, L.C., Tsai, J.P., Yeh, T.C.J., Cheng, C.C., Ke, C.C., and Feng, W., 2020, Measuring aquifer specific yields with absolute gravimetry: result in the Choushui River Alluvial Fan and Mingchu Basin, central Taiwan. *Water Resources Research*, **56**(9), e2020WR027261.
- Chen, K.H., Hwang, C., Tanaka, Y., and Chang, P.Y., 2023, Gravity estimation of groundwater mass balance of sandy aquifers in the land subsidence-hit region of Yunlin County, Taiwan. *Engineering Geology*, **315**(20), 107021.
- Christiansen, L., Lund, S., Andersen, O.B., Binning, P.J., Rosbjerg, D., and Bauer-Gottwein, P., 2011, Measuring gravity change caused by water storage variations: Performance assessment under controlled conditions. *Journal of Hydrology*, **402**(1-2), 60-70.
- Creutzfeldt, B., Guntner, A., Klügel, T., and Wziontek, H., 2008, Simulating the influence of water storage changes on the superconducting gravimeter of the Geodetic Observatory Wettzell, Germany. *Geophysics*, **73**(6), WA95-WA104.
- Crossley, D. and Hinderer, J., 2009, A review of the GGP network and scientific challenges. *Journal of Geodynamics*, **48**(3-5), 299-304.
- Dehghan, M.J., Son, E.J., Woo, I., Kim, H., You, S.M., Oh, J.J., Kim, J.C., Dorjsuren, A., and Kim, J.W., 2025, Installation, calibration, and data processing of the superconducting gravimeter at the new deep underground lab in Korea. *Pure Appl. Geophys.*, **182**, 1545-1562.
- Eom, J.-Y., Seo, K.-W., Koo, M.-H., and Kwon, B.-D., 2009, Observation of gravity changes associated with variations of ground water table. *Proceeding of Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists*, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, Jeonbuk National University, South Korea, p.119-123.
- Gehman, C.L., Harry, D.L., Sanford, W.E., Stednick, J.D., and Beckman, N.A., 2009, Estimating specific yield and storage change in an unconfined aquifer using temporal gravity surveys. *Water Resources Research*, **45**(4), W00D21.
- Goodkind, J.M., 1999, The superconducting gravimeter. *Review of Scientific Instruments*, **70**(11), 4131-4152.
- GWR Instruments, INC., 2010, Superconducting Gravity Meter: A new hydrological tool, <https://www.gwrinstruments.com/pdf/hydrology.pdf> [accessed 25.07.19]
- GWR Instruments, INC., 2011, Operating Principles of the Superconducting Gravity Meter. <https://www.gwrinstruments.com/pdf/principles-of-operation.pdf> [accessed 25.07.19]
- Hinderer, J., Crossley, D., and Warburton, R., 2007, Superconducting gravimetry. In T. Herring and G. Schubert (ed.), *Treatise on Geophysics*, Elsevier, The Netherlands, p. 65-122.
- Hinderer, J., de Linage, C., Boy, J.-P., Gegout, P., Masson, F., Rogister, Y., Amalvict, M., Pfeffer, J., Littel, F., Luck, B., Bayer, R., Champollion, C., Collard, P., Le Moigne, N., Diament, M., Deroussi, S., de Viron, O., Biancale, R., Lemoine, J.-M., Bonvalot, S., Gabalda, G., Bock, O., Gentron, P., Boucher, M., Favreau, G., Séguis, L., Delclaux, F., Cappaere, B., Oi, M., Descloires, M., Galle, S., Laurent, J.-P., Legchenko, A., and Bouin, M.-N., 2009, The GHYRAF (Gravity and Hydrology in Africa) experiment: Description and first results. *Journal of Geodynamics*, **48**(3-5), 172-181.
- Jacob, T., Bayer, R., Chéry, J., and Le Moigne, N., 2010, Time-lapse microgravity surveys reveal water storage heterogeneity in

- a karst aquifer. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **115**(B6), B06402.
- Jeon, H.-T., Hamm, S.-Y., Jo, Y.-H., Kim, J., Park, S., and Cheong, J.-Y., 2019, Study of groundwater recharge rate change by using groundwater level and GRACE data in Korea. *The Journal of Engineering Geology*, **29**(3), 265-277.
- Kennedy, J.R., Pool, D.R., and Carruth, R.L., 2021, Procedures for field data collection, processing, quality assurance and quality control, and archiving of relative- and absolute-gravity surveys, <https://doi.org/10.3133/tm2D4> [accessed 25.07.19]
- Kim, T.H., Neumeyer, J., Woo, I., Park, H.J., and Kim, J.W., 2007, Installation and data analysis of superconducting gravimeter in MunGyung, Korea; Preliminary results. *Eco. Environ. Geol.* **40**(4), 445-459.
- Lien, T., Chang, E.T., Hwang, C., Cheng, C.-C., Chen, R.-F., and Mu, C.-H., 2022, Delineating a volcanic aquifer using groundwater-induced gravity changes in the Tatun volcano group, Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **33**, 31.
- Murty, B.V.S. and Raghavn, V.K., 2002, The gravity method in groundwater exploration in crystalline rocks: a study in the peninsular granitic region of Hyderabad, India. *Hydrogeology Journal*, **10**, 307-321.
- Park, K.S., Kim, Y.D., Bang K.M., Park, H.K., Lee, M.H., So, J., Kim, S.H., Jang, J.H., Kim, J.H., and Kim, S.B., 2024, Construction of Yemilab. *Frontiers in Physics*, **12**, 1323991.
- Pendiuk, J., Degano, M.F., Guaracino, L., and Rivas, R.E., 2023, Superconducting gravimeters: A novel tool for validating remote sensing evapotranspiration products. *Hydrology*, **10**(7), 146.
- Pool, D.R. and Eychaner, J.H., 1995, Measurements of aquifer-storage change and specific yield using gravity surveys. *Ground Water*, **33**(3), 425-432.
- Prothero, W. and Goodkind, J.M., 1968, A superconducting gravimeter. *Review of Scientific Instruments*, **39**(8), 1257-1262.
- Rodell, M., Velicogna, I., and Famiglietti, J.S., 2009, Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, **460**(7258), 999-1002.
- Son, E.J., Kim, J.W., Oh, J.J., Kim, H., Hwang, C., Cheng, C.-C., Ito, Y., Tanaka, Y., Shen, W., Luan, W., Hu, M., Liu, Z., Sun, H., Chen, X., Bae, S., and Yoon, H., 2024, ENIGMA: East-asian network initiative for gravity measurement alliance: A proposal and science cases, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-3305> [accessed 25.07.19]
- Van Camp, M., de Viron, O., Watlet, A., Meurers, B., Francis, O., and Caudron, C., 2017, Geophysics from terrestrial time-variable gravity measurements. *Reviews of Geophysics*, **55**(4), 938-992.
- Van Camp, M., Vanclooster, M., Crommen, O., Petermans, T., Verbeeck, K., Meurers, B., van Dam, T., and Dassargues, A., 2006, Hydrogeological investigations at the Membach station, Belgium, and application to correct long periodic gravity variations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **111**, B10403.
- Van Camp, M., Hendrickx, M., Castelein, S., and Martin, H., 2021, Superconducting gravimeter data from membach. <https://doi.org/10.5880/igets.mb.11.001> [accessed 25.07.19]
- Voigt, C., Schulz, K., Koch, F., Wetzel, K.-F., Timmen, L., Rehm, T., Pflug, H., Stolarczuk, N., Förste, C., and Flechtner, F., 2021, Technical note: Introduction of a superconducting gravimeter as novel hydrological sensor for the Alpine research catchment Zugspitze. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **25**, 5047-5064.
- Wilson, C.R., Llubes, M., van Dam, T., and Larson, K.M., 2012a, Field test of the superconducting gravimeter as a hydrologic sensor. *Ground Water*, **50**(1), 160-170.
- Wilson, C.R., Scanlon, B., Sharp, J.M., Longuevergne, L., and Wu, H., 2012b, Field test of the superconducting gravimeter as a hydrologic sensor. *Ground Water*, **50**(3), 442-449.