

<Review>

야외지질학적 관찰을 통한 제주도 지하수 모델 제안

안웅산^{1,‡} · 전용문¹ · 기진석¹ · 김기표² · 고수연³ · 이병철³ · 정차연⁴

¹제주특별자치도 세계유산본부

²제주특별자치도 환경보전국

³(주)지엠씨

⁴한국농어촌공사 제주지역본부 지하수지질부

요 약

제주도와 같이 대부분의 수자원을 지하수에 의존하는 화산섬에서 지하수의 부존형태와 흐름특징을 파악하는 것은 수자원의 관리와 예측을 위한 매우 중요한 연구과제이다. 본 연구는 제주도 지표 및 지질단면에서 관찰되는 특징을 바탕으로 제주도 지하수를 규제하는 중요한 요인이 용암층 사이에 협재하는 불투수성 점토질 퇴적층임을 지적하고, ‘너와모델(multi-shingle model)’이라는 지하수 모델을 제안하고자 한다. 기존 연구들에서 쉽게 설명되지 않았던 지하수 수위의 수직적 불연속성, 지하수 연령의 불균질성, 지하수 수위분포 및 변동양상, 지하수의 수리지화학적 특징 등은 제시되는 모델을 통해 잘 설명된다.

주요어: 제주도, 수자원, 점토질 퇴적층, 지하수, 너와모델

Ung San Ahn, Yongmun Jeon, Jin Seok Ki, Gi-Pyo Kim, Su Hyun Koh, Byung Chul Lee and Cha Youn Jung, 2017, Proposal of new groundwater model through field observations in Jeju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 2, p. 347-360

ABSTRACT: Understanding the characteristics of groundwater occurrence in Jeju Island is crucial in managing groundwater resources which is dominant water resources in the island. This study suggests a hydrogeological model for this volcanic island named as ‘multi-shingle model’, which emphasizes the role of impermeable clay sediment layers on the groundwater occurrence, based on the field observations and previous findings from literature reviews. The model can explain the characteristics of groundwater occurrence in Jeju Island such as vertical discontinuity of groundwater level, heterogeneity of groundwater age, areal distribution and fluctuation patterns of groundwater level and hydrogeochemical characteristics of groundwater, which are not fully explained by the conventional model in the previous studies.

Key words: Jeju Island, groundwater resource, clay sediment, groundwater, multi-shingle model

(Ung San Ahn, Yongmun Jeon and Jin Seok Ki, World Heritage Office, Jeju Special Self-Governing Provincial Government, Jeju 63341, Republic of Korea; Gi-Pyo Kim, Environmental preservation bureau, Jeju Special Self-Governing Provincial Government, Jeju 63122, Republic of Korea; Su Hyun Koh and Byung Chul Lee, Geo Management Companyn GMC, Jeju 63220, Republic of Korea; Cha Youn Jung, Groundwater & Geology division, Rural Community Corporation Jeju Regional Headquarter, Jeju 63318, Republic of Korea)

1. 서 언

하와이, 카나리제도, 제주도 등과 같은 화산섬들은 투수성이 좋은 화산암으로 이루어져 집중호우 시기를 제외하면 연중 물이 흐르는 하천이 거의 존재하지 않아 대부분의 수자원을 지하수에 의존한다(예,

Peterson, 1972; Cruz and Silva, 2001; Cabrera and Custodio, 2004; Won *et al.*, 2005). 이러한 이유로 화산섬에서 지하수의 부존형태와 흐름 특징을 밝히는 것은 지하수 자원의 관리와 예측에 매우 중요한 연구과제이다.

화산섬들의 수리지질학적 특징을 설명하는 지하

[‡] Corresponding author: +82-64-710-7483, E-mail: ungsan@hanmail.net

수 모델로는 하와이언 모델(Hawaiian model)과 카나리 섬 모델(Canary Island model)이 제시되고 있다(Cruz and Silva, 2001). 하와이언 모델에서는 지하수대를 저지대의 기저지하수대(basal water table aquifer)와 고지대의 화산재 및 토양층 위에 부유되어 있는 부유지하수, 그리고 관입암들에 의해 규제되어 있는 지하수대로 분류한다. Cape Verde Island (Heilweil *et al.*, 2009), 카나리제도의 Tenerife섬 (Ecker, 1976)이 이 모델로 설명된바 있다. 한편, 카나리 섬 모델은 지하수대가 지하의 저투수성 화산돔체 상위에 분포하는 것으로 해석하는 모델로, 카나리 제도의 화산섬(Cabrera and Custodio, 2004; Custodio, 2007), Azores의 Pico섬(Cruz and Silva, 2001)과 Reunion Island (Join *et al.*, 2005) 등이 이 모델로 설명된바 있다.

제주도의 경우 담수와 해수의 관계, 지하지질구조, 부존된 장소 및 부존 형태 등에 따라 상층부 지하수와 기저지하수로(Nahm, 1966), 혹은 상부유동 지하수와 기저지하수로 구분(Kim, 1969)된 바 있으며, 이후 보다 세분되어 상위지하수, 기저지하수 및 중간기저지하수로 구분되고 있다(Mink, 1981; KOWACO, 1993; Won, 1994; Hahn *et al.*, 1997; Koh, 1997; Won *et al.*, 2006). 기존의 제주도 지하수 구분은 카나리섬 모델보다는 하와이언 모델이 제주도의 지하수 특징을 보다 잘 설명할 수 있음을 의미한다.

제주도 지하수의 수리지질학적 특징의 해석과 관리 및 예측을 위한 지하수 모델을 제안하기 위해서는 무엇보다 제주도 지하수의 부존형태를 결정짓는 중요한 지질요인을 밝히는 것이 중요하다. Choi (1992)는 제주도의 지하수 부존을 결정해주는 투수성 요소로 절리와 균열을, 그리고 불투수성 요소로 치밀한 암석과 고기 토양(paleosols)을 들었으며, Lee *et al.* (2008)은 지하의 점토질 퇴적층이 지하수의 수직적 투과와 오염물질의 이동을 막는 자연 장애물로 작용할 수 있음을 지적하고, 지하수 흐름에 있어 점토질 퇴적층의 역할을 부분적으로 강조한 바 있다. 또 다른 연구들에서는 제주도 화산활동 초기에 형성된 서귀포층이 제주도 전역의 지하에 분포되어 지표로부터 침투된 강우를 저장해주는 그릇과 같은 역할을 하는 것으로 해석하고 있다(Won, 1994; Koh, 1997; Choung *et al.*, 2004; Won *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2011; Yoon and Koh, 2011). 전자의 연구들은 용암층 사이에 협

재된 점토질 퇴적층이, 그리고 후자는 서귀포층이 지하수 부존을 결정짓는 요인임을 지목한 것이다. 하지만 제시된 주요 지질요인과 제주도 지하수의 유동 및 부존과의 관계를 포괄적으로 설명할 수 있는 지하수 모델은 제시된바 없다.

본 연구에서는 야외지질학적 관찰을 통해 용암층 사이에 협재된 점토질 퇴적층이 제주도 전역의 지표 및 지하에 연속적으로 분포할 뿐만 아니라, 불투수성이 크다는 점에 주목하고, 제주도 지하수를 통제하는 중요한 요인임을 새롭게 제시하고자 한다. 더 나아가 제주도 지하수의 흐름, 수리지화학적 특징, 분포 등을 설명할 수 있는 새로운 모델을 제안한다.

2. 제주도 지질개요

제주도는 한반도 남서쪽의 황해 대륙붕에 위치하는 화산섬으로, 약 180만 년 전부터 역사시대에 걸친 다양한 화산활동에 의해 형성되었다(Tamanyu, 1990; Lee *et al.*, 1994; Yi *et al.*, 1998; Li *et al.*, 1999; Kim and Lee, 2000; Kang, 2003; Brenna *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2014; Ahn, 2016). 제주도는 동-서 길이가 74 km이며 남-북 길이가 32 km인 타원형의 순상화산체이다.

제주도 화산암은 약 45~65%의 SiO₂ 함량 범위를 가지며, 알칼리 현무암에서 조면암에 이르는 알칼리암류를 비롯하여, 전이질 현무암 및 서브알칼리암류인 톨레아이트질 현무암과 톨레아이트질 안산암에 걸친 조성을 나타낸다. 특히 제주도 동서부 지역의 용암류는 남부 및 북부 지역에 비해 전이질 현무암과 서브알칼리암류가 상대적으로 더 우세하게 분포하는 경향이 있다(Koh *et al.*, 2013). 제주화산섬을 형성한 용암의 양은 대략 350~500 km³ 정도일 것으로 추정된다(Brenna *et al.*, 2012).

1960년대 이후 지하수 개발을 위한 제주 전역에 걸친 시추 작업으로 제주도의 지표 및 지하 지질에 대한 이해가 크게 증대되었다. 시추공 자료 및 화산암내 압편 등에 의하면 제주도의 기반암은 한반도 남서부와 유사하게 선캠브리아 시대의 변성암류, 쥐라기에서 백악기의 화산암과 산성 화산암류 등으로 구성된다(Kim *et al.*, 2002). 기반암 상부에는, 제주도의 화산활동이 본격적으로 시작하기 전인 플라이오세 기간 동안 퇴적된 대륙붕 퇴적물로 해석되는 분급이 좋은 석영모래와 진흙이 70~250 m의 두께

로 쌓여 형성된 U층(미고결 퇴적층)이 놓여 있다(Koh, 1997; Sohn and Park, 2004). U층의 상부에는 현무 암질 화산쇄설물과 화석이 다량 포함되어 있는 약 100 m 두께의 서귀포층이 분포하는데, 이 지층은 제주도 화산활동 초기에 대륙붕 환경에서 형성된 수성 화산체(응회환과 응회구)와 이들 화산체가 침식되고 다시 퇴적되어 형성된 해성 퇴적암 등으로 구성된다(Sohn and Park, 2004; Sohn *et al.*, 2008). 이 기간 동안 제주도 지하 맨틀에서는 상대적으로 적은 양의 마그마가 형성되어 간헐적이고 국지적인 화산활동이 약 100만 년에 걸쳐 일어났다. 서귀포층이 퇴적되면서 원시 제주도는 변동하는 신생대 제4기의 해수면 위로 점점 성장하였다. 이후 약 30~45만 년 이후부터 상대적으로 짧은 시간동안 많은 양의 마그마가 생성·분출되어 용암대지 및 순상화산이 형성되고 오늘날과 같은 한라산을 비롯한 제주도의 대략적인 지형이 형성되었다(Brenna *et al.*, 2012; Koh *et al.*, 2013). 특히 지금으로부터 약 18,000년 전의 최종빙기 최성기 이후부터 중기 홀로세 동안에도, 즉 현재와 해수면이 비슷해진 시기에 현재의 해안선을 따라 여러 장소에서 수성화산활동이 일어나 송악산과 일출봉 등의 응회환과 응회구가 형성되었다(Sohn *et al.*,

2002, 2012; Cheong *et al.*, 2007; Ahn, 2016). 최근에는 병악오름과 같은 제주도 내륙 지역에서도 약 5,000년 이내의 화산활동이 보고되고 있다(Lee *et al.*, 2014).

3. 야외지질학적 관찰과 해석

3.1 암층 사이에 협재된 불투수성 점토질 퇴적층

제주도 서쪽 수월봉 해안 절벽에는 두께가 30~200 cm의 점토질 퇴적층인 고산층이 분포한다. 고산층의 상부에는 수월봉 화산쇄설층이 놓이고(그림 1), 하부에는 파호이호이의 특징을 보이는 광해악현무암이 놓인다(Park *et al.*, 2000). 점토질 고산층 상부에 놓이는 수월봉 화산쇄설층에는 ‘녹고의 눈물’이라는 전설이 있을 정도로 절벽을 따라 지하수가 끊임없이 흘러나온다. 상대적으로 투수성이 좋은 화산쇄설층을 통과한 지하수가 상대적으로 투수성이 낮은 점토질의 고산층을 통과하지 못하고 그 상부를 따라 흘러나오는 것이다. 하지만 고산층과 접하는 수월봉 화산쇄설층의 모든 지점에서 지하수가 흘러나오는 것이 아니라, 고산층의 높이가 낮은 곳에만 국한되어 지하수가 스며 나온다. 이는 화산쇄설층을 투

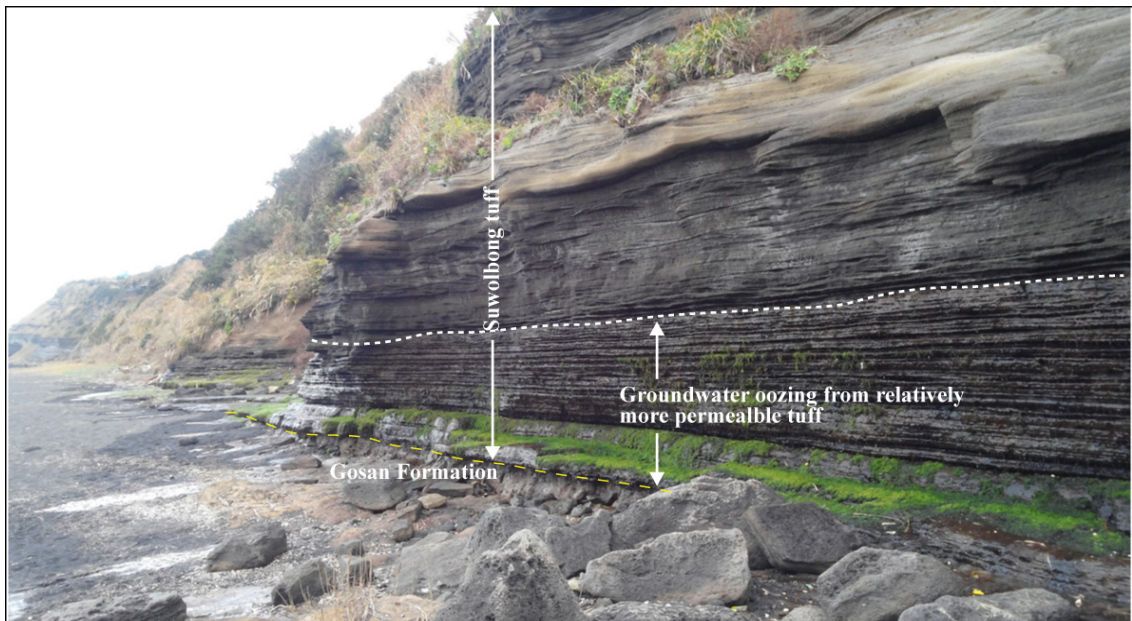


Fig. 1. Suwobong Tuff and underlying Gosan Formation exposed along the west coast of Jeju Island. Groundwater is discharged out through the boundary between upper permeable Suwobong tuff and lower impermeable Gosan Formation.

과한 지하수가 점토질 퇴적층을 투과하지 못하고 퇴적층의 지형기복(점토층의 지형기복은 일차적으로 광해악현무암이 이루는 지형기복에 영향을 받음)을 따라 낮은 곳으로 흘러가기 때문일 것이다. 만약 이와 같은 현상이 지하의 용암층 사이에 협재된 퇴적층 상부에서 일어나고, 적당한 곳에 지하수가 집수된다면 하나의 지하수체가 형성될 것이다.

제주도 시추코아 주상도자료를 살펴보면, 제주도 지표하 용암층과 용암층 사이에 수 cm에서 수 m에 달하는 점토질 퇴적층이 적게는 1매, 많게는 10여 매까지 분포한다(그림 2)(Jeon, 2009; Jeju Special Self-Governing Province (JSSGP) Water Resource Headquarters, 2001, 2012). 이러한 지하 점토질 퇴적층은 실제로 일부 해안가 절벽 혹은 채석장 절개지에서 수평적으로 연속성 있게 분포하는 것이 관찰되기도 한다(그림 3). 앞서 살펴본 바와 같이, 용암층 사이에 협재된 불투수성의 점토질 퇴적층이 넓은 영역에 수평적으로 연속적으로 분포하는 점, 지하에 반복적으로 여러 매 발달하는 점 등은 제주도 지하수를 규제하는 주요한 요인임을 지시한다(예, Choi, 1992).

3.2 지표에서 관찰되는 대규모 집수지역

제주도 서부 고지대에는 불레오름~1100습지~습은뱅뒤 등으로 이어지는 비교적 넓은 면적의 습지가

분포한다. 습지 바다는 점토질 퇴적물이 분포하고, 연중 지표로 지표수가 흐른다. 이 영역의 점토질 퇴적층은 불투수성을 띠어 많은 양의 지표수를 지하로 침투시키지 않고 지표로 흘러보내는 역할을 한다(그림 4). 만약 불투수성의 점토질 퇴적층 상부에 후기에 흘러온 용암류나 화산쇄설성 퇴적층이 덮인다면, 지표의 암층을 투과한 지표수는 불투수성의 점토질 퇴적층을 따라 흘러 하류의 적당한 공간에 집수될 것이다(예, Hemmings *et al.*, 2015). 지하로 스며든 물이 용암층 사이의 불투수성 점토층에 의해 낮은 쪽으로 흘러 적당한 규모의 저류지역(지표상의 대규모 습지지역과 유사한)을 만난다면 지하수체가 형성될 수 있음을 유추할 수 있다.

4. 새로운 지하수 모델 제안

야외지질학적 관찰사항 및 시추자료를 바탕으로 제주도 지하수 흐름을 유추해보면, 용암류 혹은 화산쇄설암을 통과하여 지하로 스며든 수자원은 지하 용암층 사이에 협재된 불투수성의 점토질 퇴적층에 의해 지하 집수지역으로 집수되거나 혹은, 하천과 같이 점토질 퇴적층이 소실된 곳을 따라 지하로 더 깊이 침투될 것이다. 더 깊은 곳으로 침투된 지하수는 보다 깊은 곳에 분포하는 점토질 퇴적층에 의해 또

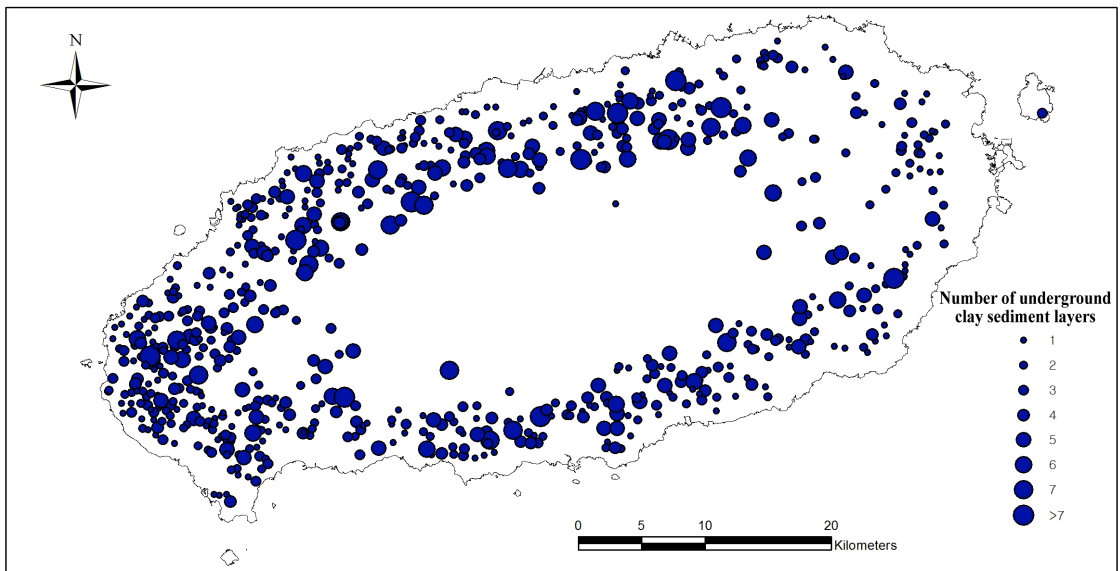


Fig. 2. Number of occurrence of the underground clay sediment layers (JSSGP Water Resource Headquarter, 2001, 2012). Only the clay unit in borehole logging data is counted as the clay sediment layer.

다시 집수 및 지하로의 침투와 흐름이 반복될 것이다. 결국 여러 겹의 점토질 퇴적층을 따라 아래로 흘러든 지하수가 집수되어 지하수체를 이루게 된다(그림 5b). 이와 유사한 지하수 흐름 설명은 Choi (1992), Dafny *et al.* (2006) 등에서 제시된바 있다. 본 연구에서는 이와 같은 제주도의 독특한 지하수 흐름특징을 설명하기 위하여 ‘너와모델’이라는 새로운 지하수 모델을 제안한다(그림 5).

기존 연구에서는 상위지하수만이 비포화대 내의 치밀한 화산암류나 고토양층, 퇴적층 등의 저투수성 지층 상부를 따라 비교적 빠르게 유동하거나 고여 있는 부유지하수체(perched water)라고 보고, 비포

화대의 다른 대수층과 수직적으로 연결되지 않은 단속적인 지하수체로 보았다(Yoon and Koh, 2011). 새롭게 제시되는 지하수 모델에서는 불투수성 퇴적층에 의해 규제되는 지하수가 수평적, 수직적으로 서로 연계되어 있으며, 이러한 반복적인 연결성에 의해 상당한 규모의 지하수체로 서서히 성장해 가는 것으로 해석한다(그림 5b).

5. 토 의

5.1 너와모델을 이용한 제주도 지하수 특성 해석 너와모델은 ① 지하수 수위의 수직적 불연속성,



Fig. 3. The outcrop of clay sediment layers between lava flow layers found in a quarry.



Fig. 4. Jeju 1100 Altitude Wetland having surface water running on the clay deposit.

② 지하수 연령의 불균질성, ③ 지하수 수위분포 및 변동양상, ④ 지하수의 지화학적 특징 등 기존의 연구들에서 잘 설명되지 않았던 제주도 지하수의 특징을 잘 설명할 수 있다. 기존 연구들에서 보고된 여러 제주 지하수의 특징들을 너와모델의 관점에서 재해석해 본다.

5.1.1 지하수 수위의 수직적 불연속성

제주도 시추공에 나타나는 대수층이 단일 대수층인 경우도 있으나, 일반적으로 저투수층으로 분리된 몇 개의 대수층으로 나타난다고 보고된 바 있다(Jung, 2002; Kim *et al.*, 2004; Youn *et al.*, 2009). 특히 Jung

(2002)은 지하수 개발을 위한 굴착시 대수층의 관통에 따른 수위상승과 양수시험시의 수위저하를 볼 때, 지하수는 상당히 피압을 받고 있는 대수층에 부존하고 있다고 보고하였다. 더 나아가 동일한 위치의 관정에서 심도에 따라 분리된 대수층은 각각 피압의 정도가 서로 다르게 나타난다고 보고하였다. 너와모델에 의하면 대수층들이 점토질 퇴적층에 의해 구획화(compartmentalization)됨으로 인해 대수층별로 피압의 정도가 서로 다를 수 있을 것으로 추정할 수 있다. 그런가 하면, Youn *et al.* (2009)는 양수시험을 통해 부유대수층(perched aquifer)의 지하수 산출능력이 양호함을 보고할 뿐만 아니라, 제1대수층 및 제2

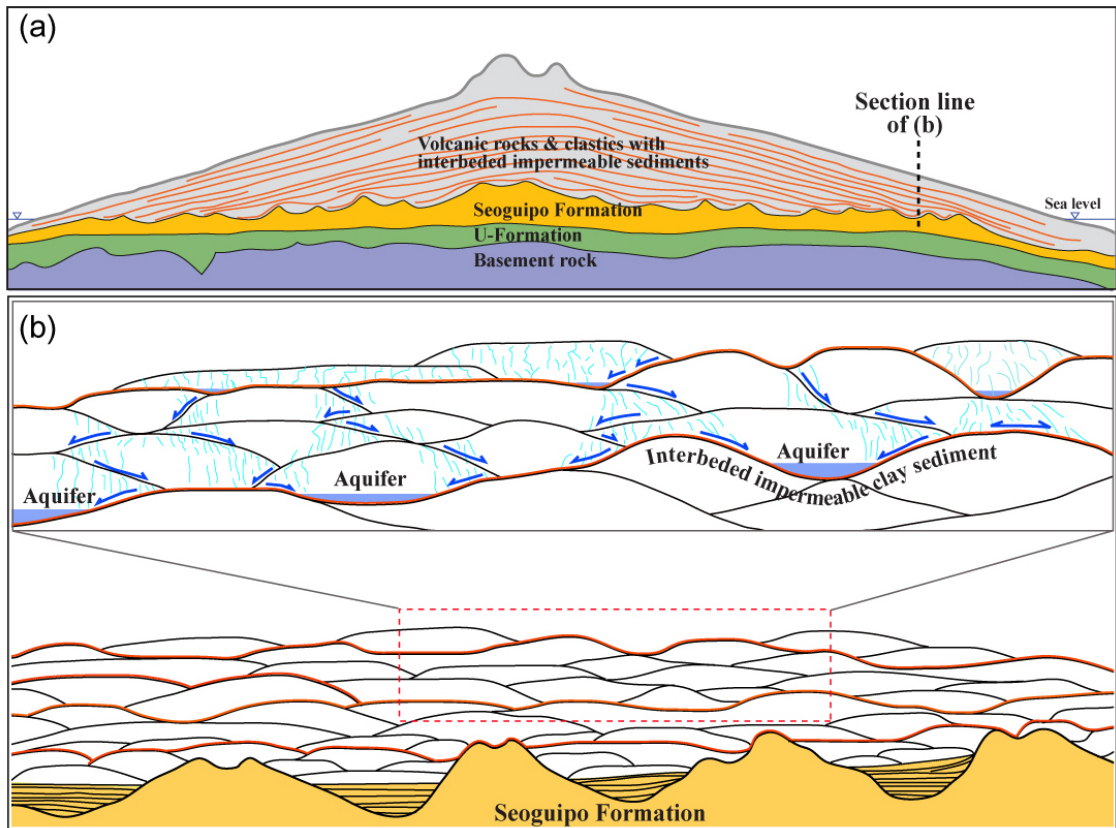


Fig. 5. Conceptual model named as ‘multi-shingle model’ describing the groundwater occurrence and flow in Jeju volcanic aquifer. (a) Schematic cross section of Jeju volcanic island, consisting of basement rock, U-Formation, Seoguipo Formation, and volcanic rocks and clastics with interbedded impermeable clay sediment layers (yellow lines). There found several layers of clay sediment at different depth which are deposited widely during the hiatus in the volcanic activities of different times. (b) Enlarged schematic cross section describing groundwater flow and occurrence of aquifers. Percolated rainwater through permeable volcanic structures such as voids and fractures flows along on impermeable clay sediment layers interposed between lava flow layers according to topographical gradient of the layers resulting in localized aquifers which are interconnected vertically and/or laterally. The interconnected local aquifers could become bigger aquifer as going deeper.

대수층이 용암류와 퇴적층의 경계면을 따라 호층으로 발달하고 있으며, 지하수로 완전히 포화된 상태가 아니며, 대수층별 지하수 산출능력도 차이가 남을 보였다. 특히 시추과정에서 지층 및 시추심도 변화에 따라 수위변화가 발생하는 것은 대수층들이 서로 호층으로 발달하고 있어, 시추에 의해 인위적으로 수직 관통되었을 때 투수층을 통해 지하수가 누수되어 수위변화가 발생한 것으로 해석하였다. 즉 용암류와 퇴적층이 각각 호층으로 발달하고 있어 누수대수층으로 작용할 수 있다고 해석한 것이다. 이러한 연구와 유사하게, Lee *et al.* (2008)은 양수관정에 있어서 지하수면 보다 더 높은 지점의 관정벽면에서 지하수가 떨어지는 현상(JPDC, 2005)을 소개하고, 주대수층보다 높은 위치에 부유대수층이 부분적으로 존재할 수 있다고 추정하였다. 이상과 같이 수직적으로 서로 분리된 다수의 대수층, 일부 대수층에서 나타나는 피압현상과 누수현상, 대수층별 산출량의 차이 등의 특징은, 지하수가 불투수성의 서귀포층 그릇에 모여 있는 것이라기보다, 용암층들 사이에 여러 층 존재하는 불투수성의 퇴적층에 의해 지하수가 구획화될 뿐만 아니라, 지하수 흐름 자체도 규제된다는 것을 지시하는 직접적인 증거이다(예, Thomas *et al.*, 1996; Hemmings *et al.*, 2015).

5.1.2 지하수 연령의 불균질성

기존 제주도 지하수에 대한 수리지화학적 및 환경 추적자 연구들은 제주도 지하수의 상당수가 오래된 지하수와 젊은 지하수 요소의 이성분 혼합체로 구성되었다고 보고한바 있다(Koh and Kim, 2004; Koh *et al.*, 2005, 2006, 2012). 만약 제주도 지하수가 서귀포층이라는 하나의 큰 그릇에 담긴다면(비록 여러 작은 그릇으로 나뉠 수는 있겠지만), 젊은 지하수와 오래된 지하수 성분의 혼합체로 인지되기는 어려울 것이다. 그런가 하면, Youn *et al.* (2009)는 시추공에서 수직적으로 분포하는 3개의 대수층에 대한 지하수 연대측정 결과, 하부 대수층으로 갈수록 지하수의 연령이 커지는 것을 보고하였다. 상대적으로 더 오랜 시간동안 여러 겹의 퇴적층과 암석층을 통과한 하부 대수층으로 갈수록 보다 큰 지하수 연령이 얻어진 것이다. 너와모델에서처럼 수직적으로 분포하는 여러 매의 불투수성 점토질 퇴적층을 따라 흘러가는 지하수가 관정에 의해 관통된 이후 수직적으로

나뉘진 각각의 대수층으로부터 한꺼번에 양수된다면 오랜 지하수와 젊은 지하수의 혼합체로 양수될 수 있으며, 각각의 대수층에서 연대가 측정된다면 아래 쪽으로 갈수록 오랜 연대가 얻어질 것이다.

5.1.3 지하수 수위분포 및 변동양상

Kang *et al.* (2008)는 제주도 전역에서 관측된 257개 관정에 대하여 해안선으로부터 이격거리에 따라 지하수위 변동을 연구한 결과, 표고와 강우에 의해 지배적인 영향을 받으며, 표고와 지하수 수위 사의에 상관계수가 높다고 보고한 바 있다. 특히 해안선에서 4 km 정도까지는 지하수위가 선형적으로 증가하지만, 4~9 km 지역에서는 지하수위가 증가와 감소가 반복되면서 증가한다고 하였다. 지표하의 점토질 퇴적물들이 옛 화산지형을 따라 여러 층 분포하는 것을 고려하면, 내륙지역에는 여러 겹의 퇴적층들이 분포하며 이들 퇴적층의 상부와 하부 구간에는 용암류가 호층으로 발달하고 있어 누수대수층으로 작용할 수 있다(예, Lee *et al.*, 2008; Youn *et al.*, 2009). 앞서 언급한 바와 같이 내륙지역에서는 서로 구획화된 대수층들이 시추에 의해 인위적으로 수직 관통됨으로 인해 대수층 사이의 불포화된 투수층을 통해 지하수가 누수됨으로 인해 섬의 내륙지역에서는 지하수 수위가 대체로 일정하지 않을 것이다. 이에 비해 해안 가까운 곳(0~4 km 이내)에는 상당 구간 유리질쇄설층이 분포하기 때문에 해수가 쉽게 내륙으로 침투되어 Ghyben-Herzberg 원리에 의해 담수와 해수와의 평형에 의해 내륙으로 갈수록 지하수 수위가 일정하게 증가될 것이다(그림 6). 이러한 지하수 수위의 공간적 특징은 너와모델로 잘 설명된다.

한편, Kim *et al.* (2011)는 제주도 남부지역에서는 저투수층 출현고도와 지하수 수위가 상당히 밀접한 상관성을 보이지만, 북부지역, 동부지역, 서부지역에서는 상관성이 상대적으로 낮다고 보고하였다. 저투수층의 고도로 산정한 서귀포층(혹은 고결 응회암)의 고도와 지하수 수위의 상관성이 낮은 것은 지하수를 규제하는 제 3의 요인이 있음을 간접적으로 지시하는 것이기도 하다.

5.1.4 지하수의 수리지화학적 특징

지하수의 지화학적 특징은 기후, 토양특성, 암종, 지하수의 순환형태, 지형, 연안지역에서의 해수침투,

인간활동 등 여러 요인에 의해 영향을 받기 때문에, 지하수의 순환 특성을 보여줄 수 있다(Ko *et al.*, 2005).

Ko *et al.* (2005)는 성분별 크리킹을 통해 지하수 성분의 공간적 분포 특징을 파악한 결과, Sr, Ca 및 HCO_3 농도 분포가 매우 유사한 특징을 보여주며 서부지역에서 비교적 높게 나타난다고 보고하고, 그 원인을 서귀포층의 탄산염광물이나 패류 성분의 용해에 의한 것으로 추정하였다. Koh *et al.* (2009) 또한 제주 지하수를 6개 그룹으로 분류하고, 제주 남서부의 high-mineral water 그룹에서 나타나는 높은 Ca 함량이 조면암과 서귀포층과 관계된 것으로 해석하기도 하였다. 하지만, Kim *et al.* (2011)은 저투수층(서귀포층이나 고결된 응회암류)과 지하수위 간에 상관관계가 낮음을 보고하였는데, 이는 곧 지하수가 서귀포층과 공간적 관계가 크지 않음을 의미할 뿐만 아니라, 지하수의 지화학적 성분과도 크게 관계될 수 없음을 의미하는 것이기도 하다. 너와모델에 따르면

이러한 지하수의 수리지화학적 특징은 탄산염물질을 함유한 용암층 사이의 점토질 퇴적층에서 유래한 것으로 추정된다.

제주도 용암층 하부의 점토질 퇴적층(고토양층)은 지구화학적으로 한반도 타 지역의 풍성퇴적물과 제주도 화산암류의 혼합 특성을 보이며(Jeong *et al.*, 2015), 광물학적으로 제주도 현무암질 화산활동으로는 설명이 어려운 석영입자들이 퇴적층 내에 평균 30% 이상(Lee *et al.*, 2014)에서 최대 47.7% (Mizota *et al.*, 1991)까지 포함되어 있을 뿐만 아니라, 직경 $10 \mu\text{m}$ 이하의 석영입자들이 풍성기원 석영의 산소동위원소적 특징($\delta^{18}\text{O} = +16 \sim 17\text{‰}$; Mizota *et al.*, 1991)을 나타낸다. 이러한 특징은 점토질 퇴적층이 풍성기원 퇴적층임을 지시하는 것이다. 이러한 해석은 제주도 고지대 산정분화구(동수약) 퇴적물의 석영입자 유입량 변화를 계절풍의 강도변화에 따른 풍성기원 물질의 유입량 변화로 해석한 Lim *et al.* (2005)의 연구결과로도 추

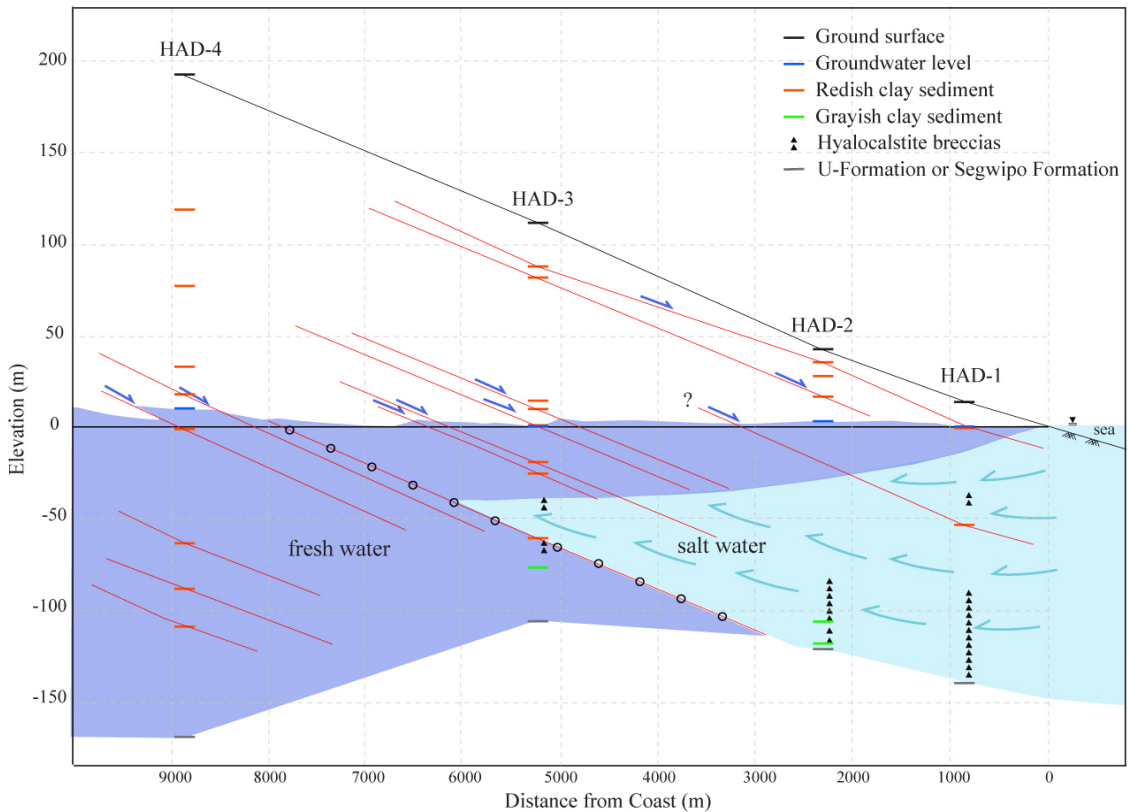


Fig. 6. Geological cross-section constructed from logs at four boreholes in Handong district on northeastern Jeju Island. Less permeable clay sediments layer (red line with black circles) may function as a natural barrier to sea water intrusion and freshwater discharge.

Table 1. New interpretation of groundwater occurrence types in Jeju Island suggested in this study by comparing with previous studies.

	Existing study (Summarized in Won <i>et al.</i> , 2006)	This study
high level groundwater	<ul style="list-style-type: none"> · Aquifers have no contact with seawater. · ^aNormally perched groundwater not hydraulically interconnected with other aquifers. · Occur only at considerably high topographic elevations above sea level. 	<ul style="list-style-type: none"> · Perched unsaturated aquifer is laterally interconnected with other aquifers by laterally continuous clay sediment layers and vertically by leakage from overlying other aquifers.
parabasal groundwater	<ul style="list-style-type: none"> · ^bThe lower boundary of the fresh water is not in direct contact with seawater and lies on impermeable or less permeable layers. 	<ul style="list-style-type: none"> · ^dDeeply buried freshwater aquifer is supplied by high elevation recharge which flows on large, laterally continuous clay sediment layers intercalated between lava layers. · ^eFreshwater is not contact with seawater by impermeable clay sediment layers, which serve as a natural barrier to seawater intrusion and freshwater discharge.
basal groundwater	<ul style="list-style-type: none"> · ^cIn aquifers, fresh water is hydraulically connected to seawater. · ^cThe entire aquifer below the fresh water portion is saturated with seawater. 	<ul style="list-style-type: none"> · In aquifers, fresh water from inland is resting on saline water from sea by buoyancy relationship. · Aquifers are formed in young lava deltas consisting of hyaloclastite breccias, pillow lavas, and massive lavas, therefore there are not laterally continuous clay sediments layers preventing seawater intrusions.

^aKoh, 1997; KOWACO, 2003

^bWon, 1994; Hahn *et al.*, 1997; Koh, 1997

^cMink, 1981; Won, 1994; Koh, 1997; Won *et al.*, 2006

^dThomas *et al.*, 1996; Dafny *et al.*, 2006

^eThomas *et al.*, 1996; Yoon and Koh, 2011

정이 가능하다. 즉, 산성호수 퇴적물에 풍성기원의 황사물질이 존재한다면 제주도 전역에 풍성기원 퇴적물이 넓게 분포한다는 것을 유추할 수 있기 때문이다. 용암층 사이사이에 분포하는 점토질 퇴적물이 풍성기원의 퇴적물이라면, 지하수 내의 Ca, HCO₃의 성분은 퇴적층이 쌓일 때 황사입자로 날려 온 암석기원의 쇄설성 방해석입자가 지하수에 용해된 결과로 판단된다. 이러한 추정은 Jeong *et al.* (2011)이 한반도 황사연구를 통해 암석기원의 쇄설성 방해석 입자들이 약 11%(입자비율) 포함되었음을 보고한 것에 의해 뒷받침된다. Choi (1992), Koh *et al.* (2007) 등은 HCO₃ 농도가 대체로 지하수 연령과 비례함을 보고하였는데, 이 또한 너와모델에서 제시하는 바와 같이 지하수가 여러 층의 점토질 퇴적층을 거치면서 획득한 지하학적 특징일 것이다.

한편, 해안지역에서 해수영향을 받는 지하수 시료를 제외하면 NO₃는 제주도 지하수 성분 중 가장 큰

변동양상을 나타낸다. 이러한 현상은 경작활동에 의한 질산염 성분의 유입에 의한 것으로 해석된다(Ko *et al.*, 2005). 특히 이들은 해안가의 지하수가 Cl은 높으나, NO₃가 낮은 것은 연령이 높은 지하수와 해수가 직접 섞였음을 지시한다고 해석 하였다. 이는 해안가 농경지 즉 지표에서 스며든 물이 지하수에 직접 영향을 미치지 않았음을 의미 하는 것이다. 이는 곧 불투수성 점토질 퇴적층이 오염물질의 침투를 막아주는 역할을 한 것으로 해석할 수 있는 것이다(예, Lee *et al.*, 2008). 결국 이러한 현상은 지하수체들이 층위별로 서로 구분되어 있다고 보는 너와모델로 설명이 가능한 것이다.

5.2 제주도 지하수 부존형태에 대한 고찰

앞에서 언급한 바와 같이 제주도 지하수는 부존 형태에 따라 크게 기저지하수, 준기저지하수, 상위지하수로 나뉜다. 기저지하수는 염수와 담수의 비중

차에 의해서 담수가 염수 상부에 렌즈상태로 부존하는 지하수이며, 준기저지하수는 담수지하수체가 해수와 직접 접하지 않으며 통상적인 G-H비가 적용되지 않는 지하수체로 정의되어 있다. 준기저지하수는 더 세분되어 해수면 보다 높게 위치하는 서귀포층 상부를 따라 지하수가 발달한 상부준기저지하수와 서귀포층이 해수면 보다 낮게 분포하는 지역에 발달한 하부준기저지하수로 나누기도 한다(Koh *et al.*, 1993; Koh, 1997). 상위지하수는 비포화대 내의 치밀질 화산암류나 고토양층, 퇴적층 등의 저투수성 지층 상부를 따라 발달한 일종의 부유지하수체(perched water)로 구분되고 있다(표 1)(Won *et al.*, 2006; Yoon and Koh, 2011).

기존 지하수 분류체계에서 준기저지하수와 상위지하수와의 구분은 G-H비가 적용되지 않는 지하수체라는 공통점 외에 뚜렷한 기준이 없다. 하지만, 너와모델의 관점에서 본다면, 상위지하수는 부유지하수체의 지하수량이 개발 가능한 일정 취수량을 갖는 지하수체로, 비포화대에 발달한 지하수체로 정의할 수 있을 것이다. 이에 비해 준기저지하수는 고지대에서 함양된 지하수가 점토질 퇴적층으로 구획화된 대수층을 따라 해안지대로 이동함에 따라, 대수층이 차츰 비포화상태에서 포화상태로 변화해 양수 시 일정한 수위를 유지할 수 있는 지하수체로 해석할 수 있을 것이다. 상위지하수와 준기저지하수는 모두 지하의 불투수성 퇴적층에 의해 규제되는 지하수로, 저투수성 퇴적층 혹은 고결 응회암층의 영향으로 바닷물이 섬의 내륙으로 더 이상 침투할 수 없는 영역에 위치하는 지하수체인 것이다(그림 6).

이에 비해 기저지하수는 젊은 화산활동으로 인해 해안지대에 넓게 형성된 용암델타 지역에 형성되는 지하수로 판단된다. 제주도 동부지역 해안지대와 같이 비교적 젊은 용암이 분포하는 지대는 유리쇄설성 각력암(hyaloclastite breccias), 배계용암, 치밀용암층 등으로 구성된다. 뿐만 아니라, 오랜 용암지대와 달리 젊은 용암지대는 불투수성의 퇴적층이 부분적으로 발달하거나 거의 존재하지 않는다(그림 6). 이러한 이유로 바닷물은 비교적 쉽게 내륙 깊숙한 곳까지 침투하게 되고, 내륙의 고지대에서 함양된 상대적으로 비중이 작은 담수는 상대적으로 비중이 큰 바닷물 상부에 떠 있는 형태를 가지게 된 것으로 해석할 수 있다(예, Kim *et al.*, 2006; Yoon and Koh, 2011).

너와모델에서는 용암층 사이에 협재된 점토질 퇴적층이 섬의 내륙으로 바닷물이 깊숙이 침투하는 것을 차단 할뿐만 아니라, 내륙의 담수지하수가 해중으로 유출되는 것을 차단함을 설명할 수 있다(그림 6)(예, Yoon and Koh, 2011; Hemmings *et al.*, 2015의 그림 19b). 그림 6은 제주도 북동부 한동 일대에 해수침투 관측을 위해 설치된 일련의 관측공(HAD-1 ~ HAD-4) 자료를 바탕으로 지하수 분포를 도시화한 것이다. 해안의 HAD-1부터 HAD-3 관정(해안으로부터 5.2 km 거리에 위치)까지는 해수 위에 담수체가 형성되어 있는데 반해, HAD-4관정(해안으로부터 8.1 km 거리에 위치)에서는 담-염수 경계면을 갖는 지하수체가 형성되지 않고 자연수위에서 공저까지 담수지하수로 이루어져 있다(Yoon and Koh, 2011). 화산활동에 의해 제주 섬의 지속적 성장과정에서 화산활동 휴지기에 광범위하게 퇴적된 불투수성 퇴적층(그림 6의 둥근점으로 표기된 점토질 퇴적층)에 의해 내륙으로의 해수침투가 차단된 것으로 해석할 수 있는 것이다.

그런가 하면, Kim *et al.* (2006)은 기저지하수가 분포하는 제주도 동부 해안지대에 설치된 일련의 해수침투 관측공(한동, 종달, 수산지역)들에 대하여 지하수의 흐름속도, 전기전도도, 지하수흐름방향 등을 측정된 결과, 이들 해안지대의 대수층이 다층 대수층구조(multilayered aquifer)를 가지고 있다고 보고하였다. 다층의 대수층들은 만조시와 간조시에 대수층별로 지하수 흐름 속도가 다르거나, 혹은 서로 다른 흐름방향이 관측되었다(Kim *et al.*, 2006의 그림 14). 이들은 해안지대의 다층 대수층 구조의 원인을 수지상(finger-shaped)으로 흘러든 여러 겹의 용암류에 있다고 해석하였다. 이러한 다층 대수층 구조는 1993년 Hawaii Scientific Drilling Project의 일환으로 실시된 해안지대 시추에서 3개의 담수대수층이 관측된 사례와 유사한데, 이 경우 담수대수층들 각각은 해수 및 염분 지하수의 상부에 놓여 있으며, 이들 대수층들은 토양 혹은 탄산염질 퇴적물로 구성된 반투수층(aquitard)으로 나뉘어져 있었다고 한다(Thomas *et al.*, 1996). Thomas *et al.* (1996)는 광범위한 토양층과 화산재층에 의해 지하수체가 구획화되어 더 깊은 바닷속으로 담수지하수를 유출시킬 수 역할을 한다고 해석하기도 하였다. 본 연구에서는 Thomas *et al.* (1996)에 제시한바와 같이 용

암층 사이에 발달한 점토질 퇴적물에 의해 해안지대의 다층 대수층구조가 형성될 수 있을 것으로 본다 (그림 6). 너와모델은 준기저지하수와 차별화된 기저지하수 형성의 원인과 분포뿐만 아니라, 기저지하수 영역에서 나타나는 다층 대수층구조 또한 설명할 수 있다(표 1).

5.3 용천수와 관정지하수

제주 용천수는 용출지점의 지질구조에 따라 용암류 경계형, 절리형, 사력층형으로 구분되는데, 이중 90.3%의 용천수는 용암류가 서로 접촉하는 경계면 또는 가장자리나 용암류 말단부를 따라 용출되는 용암류 경계형이다(Yoon and Koh, 2011). 대부분의 용천수가 용암류와 용암류 사이의 어떠한 요인(불투수성 퇴적층, 치밀한 용암류 등)에 영향을 받아 지하수가 지표로 노출되어 흘러나오는 것으로 해석이 가능한 것이다. 너와모델의 관점에서 보면, 지표의 용천수는 대체로 천부의 불투수성 점토질 퇴적층에 규제되는 지하수로 판단된다. 이는 용천수의 지하수 연령이 관정지하수에 비해 상대적으로 젊고(Jeju Provincial Government, 2001), 관정지하수에 비해 시기별 지하수량의 변화 폭이 큰 것에 의해서도 지지된다. 관정지하수와 용천수는 모두 너와모델 적용으로 해석이 가능하며, 서로 성인적으로 연계된 것이기에 통합적인 관리와 모니터링을 위한 기초 모델로 활용이 가능할 것이다.

6. 결론

대부분의 수자원을 지하수에 의존하는 제주도와 같은 화산섬에서 지하수의 부존형태와 흐름특징을 밝히는 것은 지하수 자원의 관리와 예측에 매우 중요한 연구과제이다. 본 연구는 제주도 지표 및 지질단면에서 관찰되는 지하수 흐름을 바탕으로, 지하용암층 사이에 협재하는 불투수성 점토질 퇴적층이 제주도 지하수를 규제하는 중요한 요인임을 인식하고, '너와모델'이라는 지하수 모델로 제안하였다. 모델에 따르면, 지하에 분포하는 여러 겹의 점토질 퇴적층은 제주도 화산활동 과정에 있어 여러 차례의 화산활동 휴지기 동안에 광범위하게 형성된 퇴적물로서, 제주도 지하수 흐름을 규제하고 구획화할 뿐만 아니라, 지하수가 수직적, 수평적으로 계속해서 연결되며 집수되게하는 중요한 역할을 한다. 기존 연

구들에서 보고된 지하수 수위의 수직적 불연속성, 지하수 연령의 불균질성, 지하수 수위분포 및 변동양상, 지하수의 수리지화학적 특징 등과 같은 제주도 지하수의 특징은 새로 제시되는 모델을 통해 잘 설명된다. 모델은 또한 관정지하수와 용천수 모두 해석이 가능하기 때문에, 제주도 지하수의 종합적 관리의 기초모델로 활용이 가능 할 것이다. 향후 제주도 점토질 퇴적층의 물성, 분포양상, 두께 등에 대한 정량적 연구뿐만 아니라, 너와모델 개념을 고려한 새로운 지하수 모델링 시도와 물수지 분석이 요구된다.

사 사

본 연구는 제주특별자치도 세계유산본부 자체연구 과제의 일환으로 수행되었다. 논문 심사과정에서 건설적인 비평과 유익한 조언으로 논문의 오류와 부정확한 표현을 바로잡아 주신 익명의 심사위원님께 감사드린다. 논문 준비과정에서 수리지질학적 용어와 영문을 검토해주신 한국지질자원연구원 김용철 박사님께 감사의 말씀을 드린다.

REFERENCES

Ahn, U.S., 2016, Study of the last volcanic activity on historical records on Jeju Island, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 25, 69-83 (in Korean with English abstract).
 Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E.M., Sohn, Y.K. and Maas, R., 2012, Spatio-temporal evolution of a dispersed magmatic system and its implications for volcano growth, Jeju Island Volcanic Field, Korea. *Lithos*, 148, 337-352.
 Cabrera, M. and Custodio, E., 2004, Groundwater flow in a volcanic-sedimentary coastal aquifer: Telde area, Gran Canaria, Canary Islands, Spain. *Hydrogeology Journal*, 12, 305-320.
 Cheong, C.S., Choi, J.H., Sohn, Y.K., Kim, J.C. and Jeong, G.Y., 2007, Optical dating of hydromagmatic volcanoes on the southwestern coast of Jeju Island, Korea. *Quaternary Geochronology*, 2, 266-271.
 Choi, S.H., 1992, Geological structure and groundwater resources of Cheju and Oahu Island. *The Journal of Engineering Geology*, 2, 70-91 (in Korean with English abstract).
 Choung, S.W., Woo, N.C. and Lee, K.S., 2004, Temporal & Spatial Variations of Groundwater Quality in Hanlim,

- Jeju island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 40, 537-558 (in Korean with English abstract).
- Cruz, V.J. and Silva, O.M., 2001, Hydrogeologic framework of Pico Island, Azores, Portugal. *Hydrogeology Journal*, 9, 177-189.
- Custodio, E., 2007, *Groundwater in volcanic hard rocks*. Taylor & Francis: London, UK.
- Dafny, E., Burg, A. and Gvirtzman, H., 2006, Deduction of groundwater flow regime in a basaltic aquifer using geochemical and isotopic data: The Golan Heights, Israel case study. *Journal of Hydrology*, 330, 506-524.
- Ecker, A., 1976, Groundwater behaviour in Tenerife, volcanic island (Canary Islands, Spain). *Journal of Hydrology*, 28, 73-86.
- Hahn, J., Lee, Y., Kim, N., Hahn, C. and Lee, S., 1997, The groundwater resources and sustainable yield of Cheju volcanic island, Korea. *Environmental Geology*, 33, 43-53.
- Heilweil, V.M., Solomon, D.K., Gingerich, S.B. and Verstraeten, I.M., 2009, Oxygen, hydrogen, and helium isotopes for investigating groundwater systems of the Cape Verde Islands, West Africa. *Hydrogeology Journal*, 17, 1157-1174.
- Hemmings, B., Whitaker, F., Gottsmann, J. and Hughes, A., 2015, Hydrogeology of Montserrat review and new insights. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 1-30.
- Jeju Provincial Government, 2001, Comprehensive investigation of hydrogeology and groundwater resources on Jeju Island (I). Jeju Province, Korea (in Korean).
- Jeon, Y.M., 2009, Lithofacies and emplacement processes of the volcanogenic rocks in the Cretaceous Gyeongsang Basin and Quaternary Jeju Island, Korea. (unpublished Ph.D. thesis), Gyeongsang National University, Jinju, 165 p.
- Jeong, G.Y., Choi, H.J. and Kwon, S.K., 2011, Single-particle mineralogy and mixing state of Asian dust, spring, 2009. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 24, 225-234 (in Korean with English abstract).
- Jeong, G.Y., Han, A., Cho, M., Park, M., Kwak, T. and Ahn, U.S., 2015, Mineralogical and geochemical study on the origin of paleosols in Jeju Island. 2015 Fall Joint Conference of Geological Science of Korea (Abstracts), Jeju, 68 (in Korean).
- Join, J.-L., Folio, J.-L. and Robineau, B., 2005, Aquifers and groundwater within active shield volcanoes. Evolution of conceptual models in the Piton de la Fournaise volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 147(1), 187-201.
- JPDC (Jeju Provincial Development Corporation), 2005, Report of Environmental Assessment for Jeju Samdasoo Drinking Water: Extension and Modification. Jeju Provincial Development Corporation, Jeju, Korea, 496 p.
- JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province) Water Resource Headquarters, 2001, Jeju Island Public Well Geological Logs (Volume I)(in Korean).
- JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province) Water Resource Headquarters, 2012, Jeju Island Public Well Geological Logs (Volume II)(in Korean).
- Jung, C.Y., 2002, Geology and groundwater of the western coastal area in Jeju Island, Korea. Ph. D. Thesis, Pusan National University, Pusan, 167 p.
- Kang, D.H., Yang, S.I., Kim, T.Y., Park, H.J. and Kwon, B.H., 2008, The variation characteristics of groundwater level with distance from shoreline in the Jeju Island. *The Journal of Engineering Geology*, 18, 157-166 (in Korean with English abstract).
- Kang, S., 2003, Benthic Foraminiferal Biostratigraphy and Paleoenvironments of the Seogwipo Formation, Jeju Island, Korea. Ph. D. Thesis, Pusan National University (in Korean with English abstract).
- Kim, B.S., Hamm, S.Y., Lee, M.C., Ok, S.I. and Ko, Y.S., 2011, Features of Regional Hydrogeology and Groundwater Distribution of Volcanic Rocks in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 263-276 (in Korean with English abstract).
- Kim, C., Koh, K.W., Park, Y.-S. and Youn, J., 2004, Groundwater discharge by each aquifer in western part of Jeju Island. Fall Meeting of Korean Society of Soil and Groundwater Environment (Abstracts), Jeonju University, September 9-10, 83-88 (in Korean).
- Kim, I. and Lee, D., 2000, Magnetostratigraphy and AMS of the Seogwipo Formation and Seogwipo Trachyte of Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 36, 163-180 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H., Tanaka, T., Suzuki, K., Nagao, K. and Park, E.J., 2002, Evidences of the presence of old continental basement in Cheju volcanic Island, South Korea, revealed by radiometric ages and Nd-Sr isotopes of granitic rocks. *Geochemical Journal -Japan-*, 36, 421-442.
- Kim, K.-Y., Seong, H., Kim, T., Park, K.-H., Woo, N.-C., Park, Y.-S., Koh, G.-W. and Park, W.-B., 2006, Tidal effects on variations of fresh-saltwater interface and groundwater flow in a multilayered coastal aquifer on a volcanic island (Jeju Island, Korea). *Journal of Hydrology*, 330(3), 525-542.
- Kim, O.-J., 1969, Distinctiveness of water resources and development plan in Jeju-island, *Mine Geology*, 2, 71-80 (in Korean).
- Ko, K.S., Kim, Y., Koh, D.C., Lee, K.S., Lee, S.G., Kang, C.H., Seong, H.J. and Park, W.B., 2005, Hydrogeochemical characterization of groundwater in Jeju Island using

- principal component analysis and geostatistics. The Korean Society of Economic and Environmental Geology, 38, 435-450 (in Korean with English abstract).
- Koh, D.-C., Chae, G.-T., Yoon, Y.-Y., Kang, B.-R., Koh, G.-W. and Park, K.-H., 2009, Baseline geochemical characteristics of groundwater in the mountainous area of Jeju Island, South Korea: Implications for degree of mineralization and nitrate contamination. *Journal of Hydrology*, 376, 81-93.
- Koh, D.C., Chang, H.W., Lee, K.S., Ko, K.S., Kim, Y. and Park, W.B., 2005, Hydrogeochemistry and environmental isotopes of ground water in Jeju volcanic island, Korea: Implications for nitrate contamination. *Hydrological Processes*, 19, 2225-2245.
- Koh, D.C., Cheon, S.H. and Park, K.H., 2007, Characterization of groundwater quality and recharge using periodic measurements of hydrogeochemical parameters and environmental tracers in basaltic aquifers of Jeju Island. *Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 12, 57-68 (in Korean with English abstract).
- Koh, D.-C., Ha, K., Lee, K.-S., Yoon, Y.-Y. and Ko, K.-S., 2012, Flow paths and mixing properties of groundwater using hydrogeochemistry and environmental tracers in the southwestern area of Jeju volcanic island. *Journal of Hydrology*, 432, 61-74.
- Koh, D.C. and Kim, Y.J., 2004, Characterization of groundwater flow and quality using multi environmental tracers in basaltic aquifers of Jeju Island, Fall Meeting of Korean Society of Soil and Groundwater Environment (Abstracts), Jeonju University, September 9-10, 138-141 (in Korean with English abstract).
- Koh, D.-C., Plummer, L.N., Solomon, D.K., Busenberg, E., Kim, Y.-J. and Chang, H.-W., 2006, Application of environmental tracers to mixing, evolution, and nitrate contamination of ground water in Jeju Island, Korea. *Journal of Hydrology*, 327, 258-275.
- Koh, G.W., 1997, Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implications of the Seoguiipo Formation in Cheju Island. Ph. D. Thesis, Pusan National University, Pusan, 326 p.
- Koh, G.W., Park, J.B., Kang, B.-R., Kim, G.-P. and Moon, D.C., 2013, Volcanism in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 209-230 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., Park, W.B., Youn, J., Koh, Y.G., Kim, S.H., Sin, S.J., Song, Y.C. and Yoon, S., 1993, A Study on the distribution and Water Quality of Groundwater in the East-West Region of Jeju Island. *The report of Health and Environment Research of Chejudo*, 4, 191-222 (in Korean).
- KOWACO (Korea Water Resources Corporation), 1993, Comprehensive water resources development plan of Jeju Province. Ministry of Construction, Jeju Province, KOWACO, Korea (in Korean).
- KOWACO (Korea Water Resources Corporation), 2003, Comprehensive investigation of hydrogeology and groundwater resources in Jeju island (III). Jeju Province, KOWACO, Korea (in Korean).
- Lee, J.Y., Kim, J.C., Park, J.B., Lim, J.S., Hong, S.S. and Choi, H.W., 2014, Age of volcanic activity from Quaternary deposits in Sangchang-ri, Jeju island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50, 697-706 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Lee, G.S. and Song, S.H., 2008, Understanding hydrogeologic characteristics of a well field of Pyosun in Jeju volcanic island of Korea. *Journal of Korean Earth Science Society*, 29, 396-407.
- Lee, M., Won, C.K., Lee, D., Park, G. and Kim, M., 1994, Stratigraphy and petrology of volcanic rocks in southern Cheju Island, Korea. *Journal of the Geological society of Korea*, 30, 521-541 (in Korean with English abstract).
- Li, B., Park, B.-K., Kim, D. and Woo, H.J., 1999, The geological age and paleoenvironment of the lower Seogwipo Formation, Cheju Island, Korea. *Geosciences Journal*, 3(4), 181.
- Lim, J., Matsumoto, E. and Kitagawa, H., 2005, Eolian quartz flux variations in Cheju Island, Korea, during the last 6500 yr and a possible Sun-monsoon linkage. *Quaternary Research*, 64(1), 12-20.
- Mink, J.F., 1981, The water resources of Cheju island; Occurrence and development. Industrial Site and Water resources development Corporation (ISWACO), Korea.
- Mizota, C., Endo, H., Um, K., Kusakabe, M., Noto, M. and Matsuhisa, Y., 1991, The eolian origin of silty mantle in sedentary soils from Korea and Japan. *Geoderma*, 49(1), 153-164.
- Nahm, G.Y., 1966, Geology and Groundwater of Jeju Island. Geological Survey of Korea, Groundwater resource investigation report, 3, 109-133.
- Park, K.H., Cho, D.L. and Kim, J.C., 2000, Geologic report of the Mosulpo-Hanrim Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 56 p (in Korean with English abstract).
- Peterson, F.L., 1972, Water development on tropic volcanic islands-type example: Hawaii. *Ground Water*, 10, 18-23.
- Sohn, Y.K., Cronin, S.J., Brenna, M., Smith, I.E.M., Németh, K., White, J.D.L., Murtagh, R.M., Jeon, Y.M. and Kwon, C.W., 2012, Ilchulbong tuff cone, Jeju Island, Korea, revisited: A compound monogenetic volcano involving multiple magma pulses, shifting vents,

- and discrete eruptive phases. Geological Society of America Bulletin, 124, 259-274.
- Sohn, Y.K., Park, J.B., Khim, B.K., Park, K.H. and Koh, G.W., 2002, Stratigraphy, petrochemistry and Quaternary depositional record of the Songaksan tuff ring, Jeju Island, Korea. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 119, 1-20.
- Sohn, Y.K. and Park, K.H., 2004, Early-stage volcanism and sedimentation of Jeju Island revealed by the Sagye borehole, SW Jeju Island, Korea. Geosciences Journal, 8, 73-84.
- Sohn, Y.K., Park, K.H. and Yoon, S.H., 2008, Primary versus secondary and subaerial versus submarine hydro-volcanic deposits in the subsurface of Jeju Island, Korea. Sedimentology, 55, 899-924.
- Tamanyu, S., 1990, The K-Ar ages and their stratigraphic interpretation of the Cheju Island volcanics, Korea. Chishitsu Chosajo Geppo, 41(10), 527-537.
- Thomas, D., Paillet, F. and Conrad, M., 1996, Hydrogeology of the Hawaii Scientific Drilling Project borehole KP-1 2. Groundwater geochemistry and regional flow patterns. Journal of Geophysical Research, 101(B5), 11, 683-611, 694.
- Won, J.H., 1994, Groundwater occurrence and exploitation scheme in Jeju island. In: Proc Sympo Environ Conserv Develop Use Groundwater Resour in Cheju, 92-115 (in Korean).
- Won, J.-H., Kim, J.-W., Koh, G.-W. and Lee, J.-Y., 2005, Evaluation of hydrogeological characteristics in Jeju Island, Korea. Geosciences Journal, 9, 33-46.
- Won, J.-H., Lee, J.-Y., Kim, J.-W. and Koh, G.-W., 2006, Groundwater occurrence on Jeju Island, Korea. Hydrogeology Journal, 14, 532-547.
- Yi, S., Yun, H. and Yoon, S., 1998, Calcareous nannoplankton from the Seoguipo Formation of Cheju Island, Korea and its paleoceanographic implications. Paleontological Research, 2(4), 253-265.
- Yoon, S.-H. and Koh, G.-W., 2011, Topography, geology and groundwater in Jeju Island, Korea. Naeha Corp., Seoul, 130 p (in Korean).
- Youn, J., Kim, C., Kim, T. and Kim, J., 2009, Aquifer characteristics of middle mountainous area of Gyourae-ri and coastal region of Handong-ri in eastern part of Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 45, 771-786 (in Korean with English abstract).

Received : March 14, 2017

Revised : April 7, 2017

Accepted : April 10, 2017