

제주도 서반부의 대수층 체계와 지진에 의한 지하수위 변동 특성

옥순일¹ · 함세영^{1*} · 김봉상² · 정재열³ · 우남철⁴ · 이수형¹ · 고기원⁵ · 박윤석⁵

¹부산대학교 지구환경시스템학부, ²(주)진산, ³한국방폐물관리공단, ⁴연세대학교 지구시스템학과, ⁵제주특별자치도 환경자연연구원

Characteristics of Aquifer System and Change of Groundwater Level due to Earthquake in the Western Half of Jeju Island

Soon-Il Ok¹, Se-Yeong Hamm^{1*}, Bong-Sang Kim², Jae-Yeol Cheong³, Nam-Chil Woo⁴,
Soo-Hyoung Lee¹, Gi-Won Koh⁵ and Yun-Seok Park⁵

¹Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²Jinsan Engineering, Jeju Special Self-Governing Province 690-161, Korea

³Korea Radioactive Waste Management Corporation, Daejeon 305-353, Korea

⁴Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

⁵Institute of Environmental Resources Research, Jeju Special Self-Governing Province 690-702, Korea

This study characterizes aquifer system and hydrogeologic property in the western half of Jeju Island where wells were drilled for regional water supply in three sub-areas (northwestern, western, and southwestern sub-areas). The aquifer system of the northwestern sub-area is largely composed of upper high-permeability layer, upper low-permeability layer, lower high-permeability layer, and lower low-permeability layer. On the other hand, the aquifer systems of the western and southwestern sub-areas are mostly composed of upper low-permeability layer, high-permeability layer, and lower low-permeability layer. Transmissivity and specific capacity decrease in the order of the northwestern, western, and southwestern sub-areas. The relationship between specific capacity and the top surface of tuff is negative with a high correlation coefficient of -0.848, indicating that the tuff acts as the bottom of the aquifer. Groundwater level change due to the 2004 Sumatra earthquake is an average of 23.74 cm in the northwestern sub-area, an average of 9.48 cm in the western sub-area, and none in the southwestern sub-area. Further, it is found that groundwater change due to the earthquake has a positive relationship with transmissivity and specific capacity.

Key words : aquifer system, groundwater level, specific capacity, Jeju volcanic island, earthquake

본 연구는 서반부지역(북서부 소지역, 서부 소지역, 남서부 소지역)에 광역상수도용 수원지 개발을 위하여 굴착된 지하수공을 중심으로 대수층 체계를 분류하고, 수리지질 특성을 규명하였다. 북서부 소지역의 대수층 체계는 상부 투수층-상부 저투수층-하부 투수층-하부 저투수층으로 구성되고, 서부 소지역과 남서부 소지역의 대수층 체계는 상부 저투수층-투수층-하부 저투수층으로 구성된다. 투수량계수와 비양수량은 북서부 소지역, 서부 소지역, 남서부 소지역의 순으로 낮아진다. 비양수량과 옹회암의 산출 고도는 비교적 높은 반비례 관계(상관계수 -0.848)를 보이며, 이는 옹회암이 대수층의 밑바닥 역할을 하기 때문으로 판단된다. 3개 소지역에 대해서 2004년 수마트라 지진에 의한 지하수위 변동 분석결과, 북서부 소지역에서 평균 23.74 cm로 가장 크며, 서부 소지역에서는 평균 9.48 cm이고, 남서부 소지역에서는 지하수위 변동이 나타나지 않았다. 그리고 지진에 의한 지하수위 변화는 투수량계수 및 비양수량과 정비례관계를 가지는 것으로 나타났다.

주요어 : 대수층 체계, 지하수위, 비양수량, 제주화산도, 지진

*Corresponding author: hsy@pusan.ac.kr

1. 서 론

제주도는 신생대 제3기말~제4기에 수습 회에 걸친 화산분출과 지반 용기에 의해서 형성된 화산섬으로 우리나라에서 가장 큰 섬이다. 제주도의 면적은 1,829 km²이며, 장축방향(동서방향)으로는 경사가 완만하며 길이가 74 km이고, 단축방향인 남북방향(남쪽 서귀포시에서 북쪽의 제주시 방향)으로는 경사가 급한 편이며 길이가 32 km이다. 제주도는 한라산(높이: 1,947 m)을 정점으로 완만한 구릉모양의 순상화산의 형태를 보이며, 한라산 주변에는 360여개의 오름이 분포하고 있다. 또한 한라산 정상에는 지름 575 m, 깊이 100 m의 화구호인 백록담이 자리 잡고 있다.

우리나라의 대부분 지역에서는 지표수로부터 수자원 원수를 얻고 있으나, 제주도는 거의 대부분의 수자원(음용수, 생활용수, 농업용수, 공업용수)을 지하수에서 얻고 있다. 제주도 전역에 용수의 균형적인 배분과 안정적인 공급을 위하여, 제주특별자치도 수자원본부는 2003년부터 2007년까지 제주도(II) 광역상수도사업 시설공사를 수행하여 수원지를 개발하였다. 본 연구는 제주도(II) 광역상수도사업의 일환으로 개발된 제주도 북서부 소지역(상가(SG), 남읍(NE), 어음(EU), 장전(JJ), 상귀(SK), 외도(OD)), 서부 소지역(금악(GA), 저지(JE),

서광(SE)), 남서부 소지역(상예(SY), 회수(HS))의 지하수 수원지를 대상으로 수행하였다(Fig. 1). 제주도 북서부 소지역에는 각각 6개의 지하수공이 개발되었고, 서부 소지역의 금악 수원지에는 6개공, 저지, 서광 수원지에서는 각각 10개공이 개발되었다. 그리고 남서부 소지역에는 수원지별로 각각 6개의 지하수공이 개발되었다. 각 수원지의 취수정의 지표해발고도는 50 m~312 m, 착정심도는 90 m~348 m이다.

제주도의 일반적인 지질층서는 최하부로부터 기반암(화산암류와 화강암), U층(미고결 퇴적층), 서귀포층(패류화석을 포함하는 화성쇄설암), 용암류(화성쇄설층 협재), 용암류와 용암류 사이의 퇴적층으로 이루어져 있다(Yoon *et al.*, 1995; Yoon, 1997; Koh, 1997). 제주도에서 투수성 구조는 화산암류, 용암 터널, 습골(용암 터널의 붕괴에 의한 공동), 곳자왈, 오름, 단열대, 파쇄대, 분석(scoria), 스페터, 아아 용암에 의해서 만들어진 클링커(clinker)층, 용암류와 용암류 사이의 접촉면, 유리쇄설암(hyaloclastite), 화성쇄설층, 수지질리대이다(Koh, 1997, 2001; Won *et al.*, 2006; KIGAM and Jeju-do, 2004). 특히, 아아 용암에 의해서 만들어진 클링커층에는 다량의 지하수가 부존되어 있으며, 클링커층의 하부에 치밀암이나 불투수성 내지 저투수성의 세립질 암석인 응회암이 분포할 때는 지하수 부존

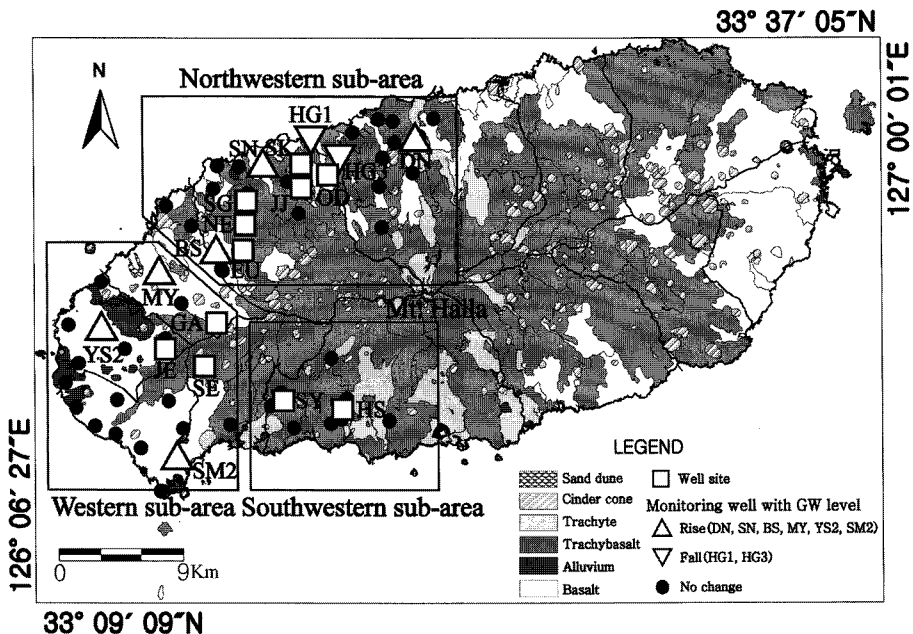


Fig. 1. Surface geology (Jeju-do and K-water, 2003) and the location of monitoring wells in the western part of Jeju Island. The well site numbers correspond to those in Table 1.

량이 더 많아지게 된다(한국지질자원연구원, 2006). 한편, 저투수성 지질매체인 치밀질 현무암층, 토양층, 응회암층, 화산재 퇴적층 등이 투수성 지층 사이사이에 반복적으로 쌓여 있다. 이와 같이 투수성과 저투수성의 지층들이 지역에 따라 그리고 심도에 따라 달리 분포하므로 제주도에서는 지역적으로 대수층의 수리적 특성과 산출성이 달라진다.

제주도에 대해서는 많은 지질학적 연구(Yoon, 1995; Yoon *et al.*, 2003; Jung, 2002; Song and Yoon, 2002; Park *et al.*, 2000, 2006), 수리화학적 연구(Koh *et al.*, 2006, 2007; Lee *et al.*, 2002, 2004, 2007), 수리지질학적 연구(Koh, 1997; 제주도, 한국수자원공사, 2003; Won *et al.*, 2006)와 지하수 산출성에 관한 연구(Hahn *et al.*, 1997; Choi, 1999; Hamm *et al.*, 2005)가 수행되었다. 그러나, 지금까지 제주도의 지하수위와 지진의 관련성에 관해서는 몇몇 연구만이 있다(Hamm *et al.*, 2009). 외국의 경우에는 지진발생 이전, 지진발생 동시, 지진발생 이후의 지하수위 변동에 관한 다수의 연구들이 수행되었으며(Montgomery and Manga, 2003; Caporali *et al.*, 2005; Ohno *et al.*, 2006; Cuttillo and Ge, 2006; Ramana *et al.*, 2007; Itaba and Koizumi, 2007; Singh, 2008), 특히 지진발생과 동시 또는 지진발생 이후의 지하수위 변동에 대해서는 많은 사례들이 보고되고 있으나(Montgomery and Manga, 2003; Roeloffs, 1998; Wang *et al.*, 2004), 지진발생 이전의 사례들은 많지 않다(Koizumi *et al.*, 2004).

본 연구에서는 제주도 서반부지역(북서부 소지역, 서부 소지역, 남서부 소지역)의 대수층 체계의 수리지질 특성을 고찰하고 지하수위와 지진의 관련성을 분석하였다. 본 연구를 위하여 북서부 소지역, 서부 소지역, 남서부 소지역의 수원지 개발공의 시추코어, 지질주상도, 양수시험 자료(Jeju-do Regional Water Management Division, 2001; Jeju Development Institute, 2001; Jeju-do and K-water, 2003)를 이용하였으며, 지진에 의한 지하수위 변동을 분석하기 위해 제주도에서 관측된 2004년의 수마트라 지진관측자료를 이용하였다.

2. 연구지역의 대수층 체계와 수리적 특성

2.1. 북서부 소지역의 대수층 체계

투수성과 저투수성의 정량적인 평가는 구간별로 투수시험을 통해서 이루어져야 하지만, 본 연구에서는 지하수공 시추자료의 압층, 클링커층, 그리고 절리대 및

파쇄대의 발달상태를 기준으로 지층의 투수성과 저투수성을 구분하고, 이에 따라 대수층 체계를 규명하였다. 특히, 동일한 압층이라도 클링커층, 절리대 및 파쇄대의 발달상태가 투수성을 결정하는 중요한 기준이 되었다. 참고로 Hamm *et al.*,(2005)이 제주도의 누수피압 대수층에서 산정한 투수층(대수층)과 저투수층(가압층)의 수리전도도 비는 17배 정도 차이를 보인다.

북서부 소지역(상가(SG), 남읍(NE), 어음(EU), 장전(JJ), 상귀(SK), 외도(OD) 수원지)의 시추공 지질은 조면암질안산암(TA), 조면암질현무암(TB), 휘석감람석현무암(AOB), 장석현무암(FB), 장석휘석현무암(FAB), 장석감람석현무암(FOB), 화성쇄설층, 화산재 퇴적층(ash deposits), 클링커층, 토양층(주로 모래로 이루어짐), 서귀포층(SGF)으로 구성되어 있다.

상가수원지의 6개 지하수공을 보면, 상부 투수층(FAB, 클링커층)-상부 저투수층(FB, AOB, TA)-하부 투수층(FOB, 화성쇄설층, 클링커층)-하부 저투수층(AOB, TA, TB)으로 구성된다. 남읍수원지의 6개 지하수공을 보면, 상부 투수층(FAB, FOB, 클링커층)-상부 저투수층(FB, TB)-하부 투수층(FOB, 클링커층)-하부 저투수층(TB)으로 되어있다. 그러나 NE-5호공에서만 지하 92~98 m 구간에서 FB가 투수층 역할을 하고 있다. 어음수원지의 6개 지하수공을 보면, 상부 투수층(FAB, FOB, TB)-저투수층(FB, TB, 화산재 퇴적층, 토양층)-하부 투수층(FAB)으로 구성된다. 다만, EU-6호공에서만 상부 투수층(FAB, FOB)-상부 저투수층(TB, FAB)-하부 투수층(FAB)-하부 저투수층(FB, TB, 토양층)의 순으로 나타난다. 장전수원지의 6개 지하수공을 보면, 상부 저투수층(TB)-투수층(FOB, FAB)-하부 저투수층(FB, TB)의 순으로 분포한다. 다만, JJ-1호공에서는 상부 저투수층(TB)-상부 투수층(FOB)-하부 저투수층(FAB)-하부 투수층(FOB, TB)-최하부 저투수층(TB, FB)의 순으로 분포하고, JJ-2호공에서는 상부 저투수층(TB)-상부 투수층(FOB)-하부 저투수층(FAB)-하부 투수층(FOB, TB)-최하부 저투수층(TB)의 순으로 분포한다. 상귀수원지의 6개 지하수공을 보면, 지표로부터 투수층(FOB, 클링커층)-저투수층(서귀포층)으로 구성된다. 다만, SK-5호공에서는 최하부에 FOB가 저투수층으로 나타난다. 그러나, 외도수원지의 6개 지하수공에서는 투수층(FOB, 클링커층)만 나타난다.

따라서, 북서부 소지역의 대수층 체계는 대체로 지표로부터 상부 투수층(FOB, FAB, 클링커층)-상부 저투수층(FB, TB)-하부 투수층(FOB, 화성쇄설층, 클링커층)-하부 저투수층(TB, FB, 화산재 퇴적층, 토양층)으

로 구성된다.

2.2. 서부 소지역의 대수층 체계

서부 소지역(금악(GA), 저지(JE), 서광(SE) 수원지)의 암석들은 조면암질현무암(TB), 장석현무암(FB), 장석회석현무암(FAB), 장석감람석현무암(FOB), 침상 장석감람석현무암(AFOB; acicular feldspar olivine basalt), 비현정질 현무암(APB; aphanitic basalt), 응회암, 화성쇄설층, 화산재 퇴적층, 클링커층, 분석, 토양층으로 구성되어 있다.

금악 수원지의 6개 지하수공의 대수층 체계는 GA-1, GA-2, GA-3호공에서는 상부 저투수층(TB, 화산재 퇴적층)-상부 투수층(FAB, FOB, 스크리아)-하부 저투수층(TB, 화산재 퇴적층, 응회암)-하부 투수층(FOB, TB, 스크리아)-최하부 저투수층(TB, 화산재 퇴적층, 응회암)으로 구성된다. 그러나, GA-4호공에서는 상부 투수층(FAB, TB)-하부 저투수층(TB, 화산재 퇴적층, 응회암, FAB)으로 구성된다. GA-5호공에서는 상부 투수층(FAB, TB)-상부 저투수층(화산재 퇴적층, FAB)-하부 투수층(FAB, TB, 스크리아)-하부 저투수층(TB, 응회암, 화산재 퇴적층)으로 구성된다. 한편, GA-6호공에서는 상부 저투수층(TB, 화산재 퇴적층, FAB)-투수층(FAB, TB)-하부 저투수층(TB, 화산재 퇴적층, 응회암)으로 구성된다. 저지수원지의 10개 지하수공의 대수층 체계는 상부 저투수층(TB, FAB, 화산재 퇴적층, APB)-투수층(TB, APB, AFOB, FOB)-하부 저투수층(응회암, 화산재 퇴적층)으로 구성된다. 서광수원지의 10개 지하수공의 대수층 체계는 상부 저투수층(TB, FAB, FB, 토양층, 화산재 퇴적층, APB)-투수층(TB, FAB)-하부 저투수층(응회암, FB, 화성쇄설층)으로 구성된다. 다만, SE-3호공의 대수층 체계는 상부 저투수층(TB, FAB, 토양층)-상부 투수층(TB, FB)-하부 저투수층(토양층, FAB, TB)-하부 투수층(FAB)-최하부 저투수층(응회암, FB)으로 구성된다.

따라서 서부 소지역의 대수층 체계는 전체적으로는 상부 저투수층(TB, 화산재 퇴적층, 토양층)-투수층(FOB, FB, 스크리아)-하부 저투수층(TB, FAB, 화산재 퇴적층, 응회암, 토양층)으로 구성되어 있다.

2.3. 남서부 소지역의 대수층 체계

남서부 소지역(상예(SY), 회수(HS) 수원지)은 조면암질현무암(TB), 장석회석현무암(FAB), 조면암(T; trachyte), 유리쇄설암, 응회암, 클링커층, 화산재 퇴적층, 분석, 서귀포층(SGF), U층(UF)으로 구성된다.

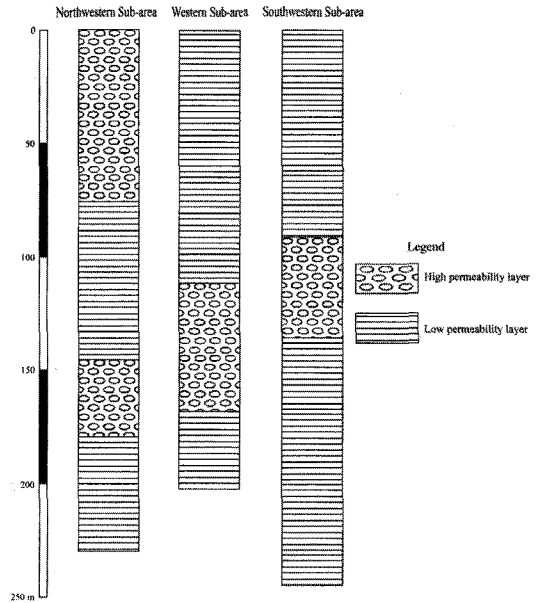


Fig. 2. Simplified aquifer systems of the northwestern, western, and southwestern sub-areas.

상예 수원지의 6개 지하수공의 대수층 체계는 SY-2, SY-3호공을 제외하고는 상부 저투수층(TB, 화산재 퇴적층, FAB)-투수층(FAB, T, TB)-하부 저투수층(TB, T, 화산재 퇴적층, 응회암, 유리쇄설암, 서귀포층, U층)으로 구성된다. 한편, SY-2호공은 상부 저투수층(FAB, TB, 화산재 퇴적층)-상부 투수층(TB, FAB)-하부 저투수층(화산재 퇴적층, TB, FAB)-하부 투수층(FAB)-최하부 저투수층(화산재 퇴적층, TB, 응회암, 유리쇄설암, 서귀포층)으로 구성된다. SY-3호공은 상부 저투수층(FAB, TB, 화산재 퇴적층)-상부 투수층(TB, FAB)-하부 저투수층(화산재 퇴적층, TB)-하부 투수층(FAB, TB)-최하부 저투수층(T, 화산재 퇴적층, TB, 응회암)으로 구성된다.

따라서 남서부 소지역의 대수층 체계는 대체로 상부 저투수층(TB, 화산재 퇴적층, FAB)-투수층(FAB, T, TB)-하부 저투수층(TB, T, 화산재 퇴적층, 응회암, 유리쇄설암, 서귀포층)으로 구성된다.

소지역별 투수층의 평균 두께를 비교하면, 북서부 소지역이 가장 두껍고, 서부 소지역 그리고 남서부 소지역의 순으로 얇아진다(Fig. 2).

2.4. 연구지역의 수리적 특성

북서부 소지역(상가·납읍·장전·어음·상귀·외도 수원지), 서부 소지역(금악·저지·서광 수원지), 남서부 소지역(상예·회수 수원지)에서 측정된 총 62개

Table 1. Specification of the pumping wells in the study area

	Site	Well depth (m)	Pump depth (m)	Pumping rate (m ³ /day)
Northwestern sub-area	Sangkwi (SK)	90-120	52-60	103-3,539
	Oedo (OD)	116-145	60	2,578-3,020
	Sangga (SG)	180-183	150	2,811-3,018
	Napeup (NE)	210-216	174	2,318-2,806
	Jangjeon (JJ)	210-211	168	2,677-2,767
	Eocum (EU)	230	203	1,450-1,640
Western sub-area	Geumak (GA)	345-348	276-289	1,400-1,830
	Jeoji (JE)	170-172	120-126	2,040-3,050
	Seogwang (SE)	200	170	2,366-2,650
Southwestern sub-area	Sangye (SY)	223-280	204-210	1,630-2,480
	Hoesu (HS)	250-252	174	1,700-1,930

지하수공 자료와 양수시험 자료를 이용하여 수리적 특성을 파악하였다(Table 1). 비양수량과 투수량계수의 빈도분포를 도시한 결과, 비양수량은 대수정규분포에 더 가까운 반면에(Fig. 3(a), (b)), 투수량계수는 정규분포

에 더 가깝게 나타났다(Fig. 3(c), (d)). 따라서, 비양수량은 기하평균을, 그리고 투수량계수는 산술평균을 사용하였다.

양수시험 자료에 의하면, 북서부 소지역 상가수원지

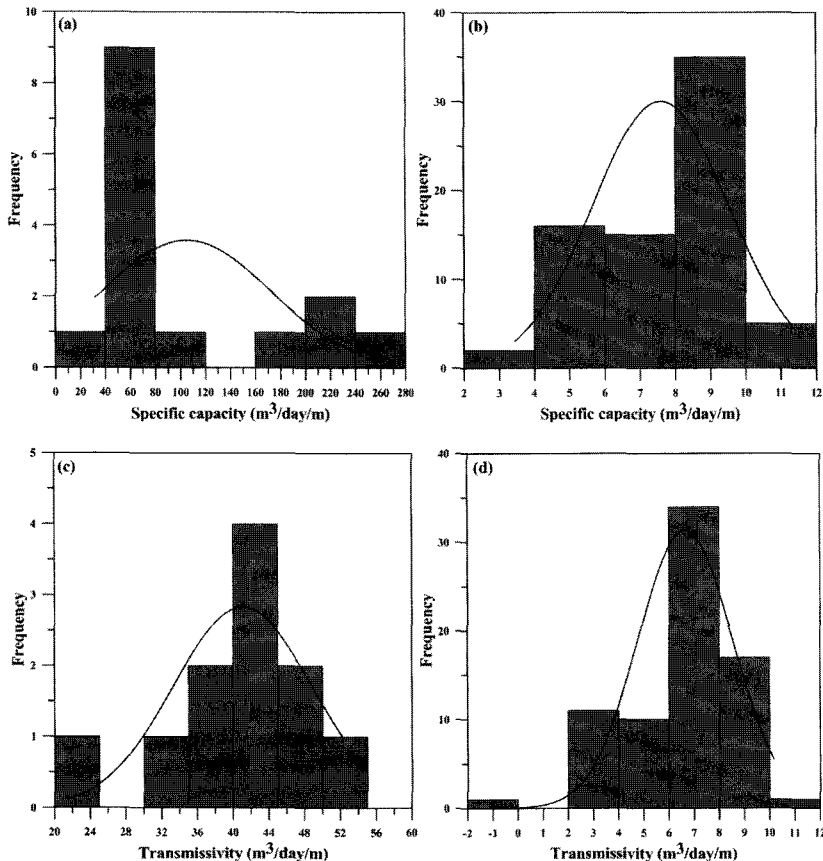


Fig. 3. Frequency distributions of (a) original values and (b) logarithmic values of specific capacity; frequency distributions of (c) original values and (d) logarithmic values of transmissivity.

의 비양수량은 평균 11,498 m³/day/m, 납읍수원지의 비양수량은 평균 2,087 m³/day/m, 장전수원지의 비양수량은 평균 9,539 m³/day/m, 어음수원지의 비양수량은 평균 12,669 m³/day/m, 상귀수원지의 비양수량은 평균 1,355 m³/day/m, 외도수원지의 비양수량은 평균 3,175 m³/day/m이다. 서부 소지역의 금악수원지의 비양수량은 평균 134 m³/day/m, 서광수원지의 비양수량은 평균 2,669 m³/day/m, 저지수원지의 비양수량은 평균 9,537 m³/day/m이다. 그리고, 남서부 소지역의 상예수원지의 비양수량은 평균 197 m³/day/m, 회수수원지의 비양수량은 평균 65.9 m³/day/m이다(Table 2). 따라서, 북서부 소지역의 평균 비양수량은 4,874 m³/day/m로서 서부 소지역의 평균 비양수량은 2,185 m³/day/m과 남서부 소지역의 평균 비양수량은 114 m³/day/m 보다 크다. 그리고, 연구지역 전체의 평균 비양수량은 1,976 m³/day/m이다.

연구지역의 비양수량값을 이용하여 Hamm *et al.*, (2005)에 의해서 간접적인 방법으로 투수량계수를 구하였다. Hamm *et al.*,(2005)은 제주도의 양수시험 분석에서 Moench(1985)의 누수대수층 모델이 가장 적합한 것으로 평가하였으며, 이는 앞에서 고찰한 대수층 체계와도 잘 들어맞는다. 따라서, Hamm *et al.*,(2005)의 투수량계수(T)와 비양수량(Q/s)간의 관계식

$$T=0.99(Q/s)^{0.89} \quad (1)$$

을 이용하여 북서부 소지역의 투수량계수를 구하면, 상가수원지에서 평균 4,389 m²/day, 납읍수원지에서 평균 1,011 m²/day, 장전수원지에서 평균 6,806 m²/day, 어음수원지에서 평균 5,366 m²/day, 상귀수원지에서는 평균 976 m²/day, 외도수원지에서는 평균 1,393 m²/day로서, 장전수원지의 투수량계수가 가장 크다. 서부 소지역에 있는 금악수원지의 투수량계수는 평균 118 m²/day, 서광수원지는 평균 1,277 m²/day, 저지수원지는 평균 5,405 m²/day이고, 남서부 소지역의 투수량계수는 상예수원지가 평균 134 m²/day, 회수수원지가 평균 41.4 m²/day이다. 따라서 연구지역 전체의 투수량계수는 평균 2,560 m²/day이다(Table 2). 연구지역 중 북서부 소지역의 투수량계수가 평균 3,379 m²/day로서 가장 크고, 그 다음으로 서부 소지역이 평균 2,597 m²/day, 남서부 소지역이 가장 낮은 평균 87.7 m²/day이다. 북서부 소지역의 높은 투수량계수와 비양수량은 세 소지역 중에서 투수층의 두께가 가장 두꺼운 것과 관련된다(Fig. 2). 또한 남서부 소지역의 낮은 투수량계수와 비양수량은 투수층의 두께가 얇고 저투수층의 두께가 두껍기 때문에 판단된다.

3. 비양수량과 지하수위 및 저투수성 암석의 관계

북서부 소지역의 상가수원지의 지하수위는 지표면

Table 2. Hydraulic properties of the study area

	Depth to water, m	Transmissivity, m ² /day		Specify capacity, m ³ /day/m		
		Range (min-max)	Arithmetic mean	Range (min-max)	Geometric mean	Range (min-max)
Northwestern sub-area	Sangga (SG)	133-140	4,389	2,079-7,832	11,498	5,406-23,992
	Napeup (NE)	126-167	1,011	400-1,751	2,087	848-4,458
	Jangjeon (JJ)	157-168	6,806	536-25,965	9,539	1,179-92,233
	Eoeum (EU)	169-176	5,366	2,965-14,609	12,669	8,056-48,333
	Sangkwi (SK)	42.7-50.9	976	111-2,741	1,355	202-7,373
	Oedo (OD)	41.3-48.1	1,393	809-2,123	3,175	1,871-5,535
	Subtotal	41.3-176	3,379	111-25,965	4,874	202-92,233
	Western sub-area	Geumak (GA)	239-261	118	42.5-394	134
Jeoji (JE)		90.4-107	5,405	1,280-19,016	9,537	3,134-65,000
Seogwang (SE)		128-136	1,277	563-2,932	2,669	1,245-7,953
Subtotal		90.4-261	2,597	42.5-19,016	2,185	68.4-65,000
Southwestern sub-area	Sangye (SY)	113-194	134	21.5-196	197	31.7-381.5
	Hoesu (HS)	120-129	41.4	34.8-48.4	65.9	54.5-79.0
	Subtotal	113-194	87.7	21.5-196	114	31.7-382
Total area	41.3-261	2,560	21.5-25,965	1,976	31.7-92,233	

아래 133~140 m, 납읍수원지는 126~167 m, 장전수원지는 157~168 m, 어음수원지는 169~176 m, 상귀수원지는 42.7~50.9 m, 외도수원지는 41.3~48.1 m에 있다. 서부 소지역의 금악수원지의 지하수위는 지표면 아래 239~261 m, 저지수원지는 90.4~107 m, 서광수원지는 128~136 m에 있다. 그리고 남서부 소지역의 상예수원지의 지하수위는 지표면 아래 113~194 m, 회수수원지는 120~126 m에 있다.

비양수량은 지하수공 지표 해발고도에 따라서 달라지고 있는데, 해발고도 100 m 이하의 지하수공에서는 비양수량이 202~7,373 m³/day/m이며, 중간값은 1,964 m³/day/m로 나타난다(Fig. 4). 100~200 m의 지하수공에서는 비양수량이 848~92,233 m³/day/m, 중간값은 5,979 m³/day/m로 나타난다. 그리고 200~350 m의 지하수공에서는 비양수량이 31.7~833 m³/day/m, 중간값은 77.8 m³/day/m로 나타난다. 따라서 100~200 m에 위치한 지하수공의 비양수량이 가장 크다. 한편, 비양수량과 수위하강의 관계를 보면, 서부 소지역과 남서부 소지역에서는 높은 음의 상관성(상관계수 R=-0.997)을 보이고, 북서부 소지역에서도 비교적 높은 음의 상관성(상관계수 R=-0.779)을 보인다(Fig. 5). 따라서, 비양수량과 지하수위의 관계는 소지역 별 대수층의 구조적인 차이와 지형고도 등과 관련되는 것으로 판단된다.

저투수성 암석인 응회암의 분포 심도는 지하수의 부존량을 파악하는데 중요한 지표가 된다고 알려져 있다(KIGAM and Jeju-do, 2004). 남서부 소지역의 저투수층인 서귀포층의 산출 심도는 해수면기준 31.0~12.1 m

이고, 응회암의 분포 심도는 해수면 기준 87.0~3.01 m에 있다. 한편, 서부 소지역에서는 저투수성 암석인 응회암이 해수면 기준 57.0~16.0 m에 위치한다. 그러나, 북서부 소지역에서는 해수면 기준으로 -36.05~41.25 m보다 깊은 곳에서 저투수성의 서귀포층이 나타나고 있다. 서부 소지역과 남서부 소지역에 대해서 비양수량(Y)과 응회암 산출 깊이(X, 해수면 기준)의 상관성을 살펴본 결과, 응회암의 산출 깊이가 깊어질수록 비양수량이 증가하는 경향성을 보이며(Fig. 6(a)), 그 상관식은

$$Y = 4.09 \cdot 10^3 e^{-0.05671 \cdot X} \quad (2)$$

이고 상관계수는 -0.848이다. 이는 저투수성 암석인 응

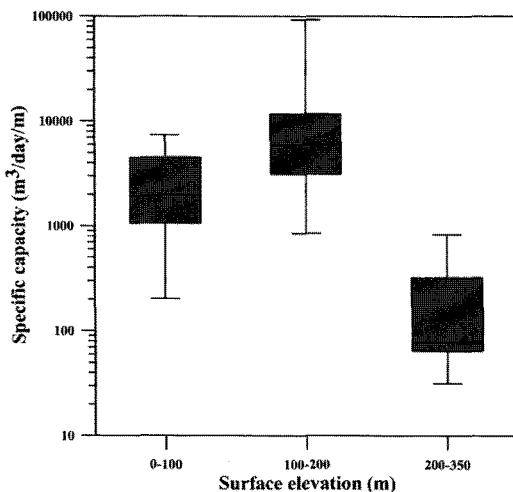


Fig. 4. Specific capacity of various surface elevations (0-100, 100-200, and 200-350 meters) in the study area.

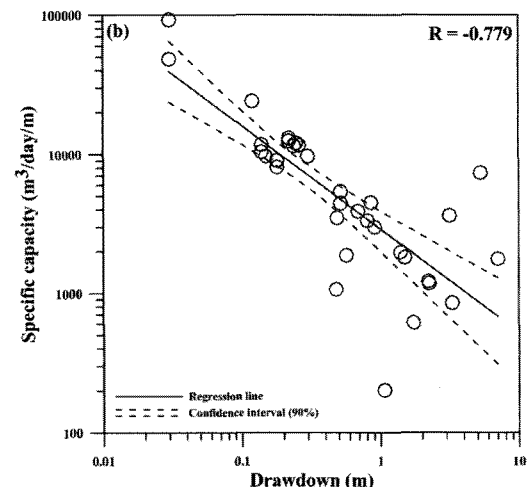
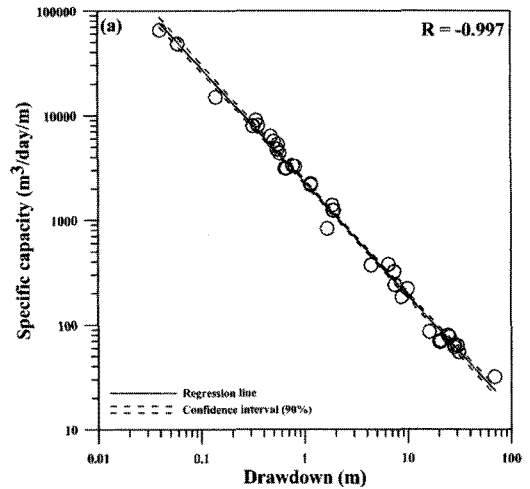


Fig. 5. Specific capacity vs. (a) drawdown in the western and southwestern sub-areas, and (b) the northwestern sub-area.

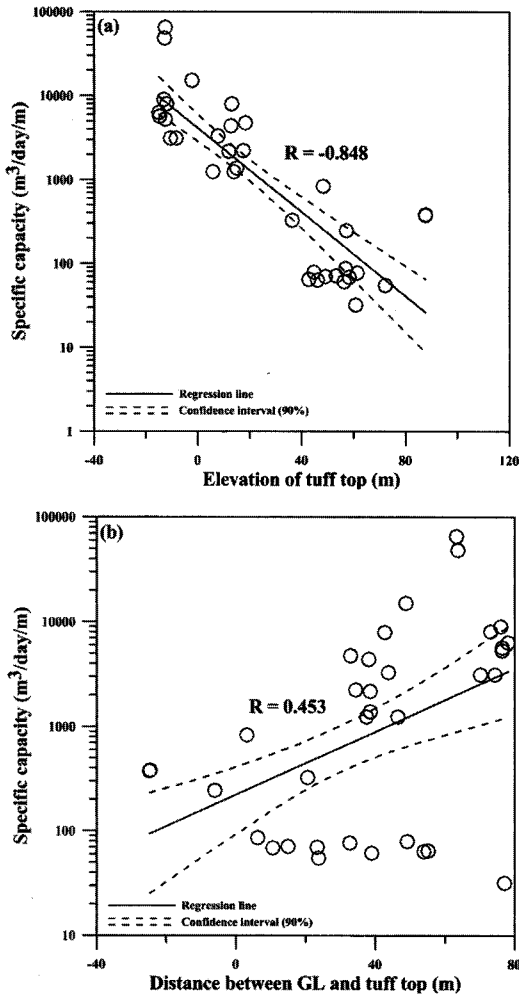


Fig. 6. Specific capacity vs. (a) the elevation of the tuff surface and (b) the distance between groundwater level (GL) and tuff surface in the western and southwestern sub-areas.

회암의 산출심도가 깊을수록 대수층의 두께가 두꺼워지는 효과를 가지기 때문이다. 따라서, 서부 소지역과 남서부 소지역에서는 옹회암의 산출 깊이가 지하수 산출량을 지시하는 중요한 인자가 될 수 있다. 한편, 비양수량과 지하수위로부터 옹회암층까지의 거리간의 상관성을 고찰한 결과, 양의 상관성(상관계수 $R=0.453$)을 보이며(Fig. 6(b)), 이는 대수층의 두께가 두꺼울수록 비양수량이 크다는 것을 간접적으로 지시한다. 그러나, 비양수량과 지하수위로부터 옹회암층까지의 거리간의 상관성은 비양수량과 옹회암 산출 깊이의 상관성보다 낮다. 그 이유는 굴착시 대수층 관통에 의해서 지하수위 변동이 발생하고 이로 인해서 대수층의 두께

산정에 불확실성이 커지기 때문이다.

4. 지하수위와 수마트라 지진의 관련성

2004년 12월 26일 00:58:53.54(세계표준시간)에 인도네시아의 수마트라 연안에서 발생한 규모 9.0의 수마트라 지진(Sumatra-Andaman Islands Earthquake)에 대해서 한국시간으로 2004년 12월 26일 오전 10:30(세계표준시간 오전 01:30)에 관측된 연구지역 지하수공의 지하수위 변동을 평가하였다. 2004년 수마트라 지진은 수마트라섬 연안의 순다해구를 따라서 발생하였으며, 이 지진으로 인해서 인도네시아, 스리랑카, 방글라데시, 미얀마, 태국, 말레이시아, 인도 등 여러 나라에 225,000명의 인명피해와 많은 재산피해가 발생하였다. 또한, 수마트라 지진은 진앙에서 약 4,600 km 떨어진 제주도에서도 지하수위 변동을 일으켰다(Hamm *et al.*, 2009). Shih(2009)는 2004년 수마트라 지진에 의한 지하수위 변동과 지진파 자료의 스펙트럼 관계를 이용하여 피압대수층의 지하수 부존성을 평가한 바 있다.

본 연구에서는 제주도 서반부 지역에 위치하는 지하수위 관측정 32개소, 해수침투 관측정 15개소, 고지대 관측정 2개소, 국가지하수관측망 2개소의 총 51개 지하수공 중 8개 관측정에서 2004년 수마트라지진에 의해서 나타난 지하수위 변동을 분석하였다(Fig. 1). 지하수위는 30분 간격으로 자동관측장치(In-Situ 사의 Troll 9000 series)를 사용하여 측정하였으며, 이 장치는 수압측정센서와 기압측정센서로 이루어져 있다. 측정된 지하수위는 무선통신 모뎀을 통하여 메인 서버로 보내져 해석되었다.

지하수위 변동을 이용한 지진의 영향을 평가하기 위해서는 지하수위에서 강수에 의한 지하수위 상승, 대기압의 영향, 조석의 영향을 제거하여야 한다. 2004년 12월에는 제주도에서 4일, 12일, 20일에 6~37 mm의 강수량을 기록하였다. 그리고 20일부터 26일(지진발생일)까지는 비가 내리지 않았다. 따라서 단기적인 강수의 영향은 미미한 것으로 판단된다. 그러나, 장기적인 지하수위 변동의 영향을 제거하기 위하여, 지하수위를 장기적인 추세선과 측정된 지하수위간의 차이로 환산하여 도시하였다(Fig. 7). 또한, 대기압과 조석의 영향은 별도로 제거하지 않았다. 이는 대기압과 조석의 영향과는 달리 지진은 순간적으로 나타나는 현상이므로 지하수위 이상값 식별이 가능하기 때문이다.

지하수위 변동 분석 결과, 북서부 소지역에서는 5개소의 지하수공(도남(DN), 하귀1(HG1), 하귀3(HG3),

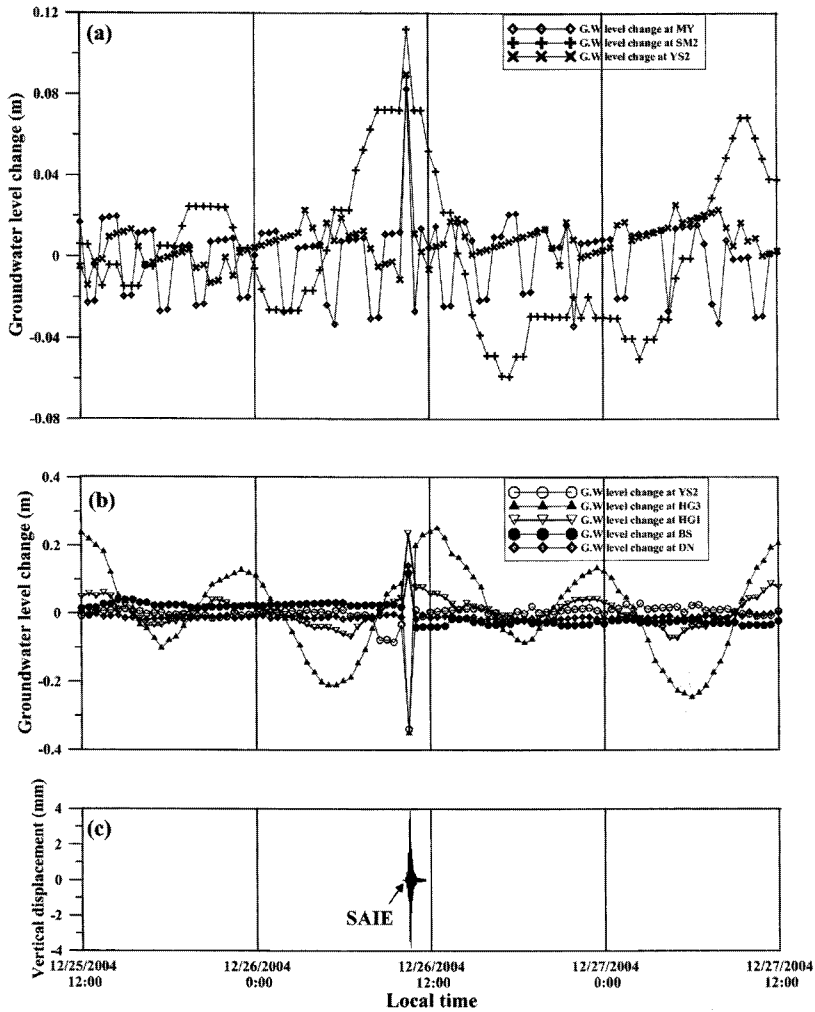


Fig. 7. Groundwater level changes at (a) the wells My, SM2, and YS2 in the western sub-area and at (b) the wells YS2, HG3, HG1, BS and DN in the northwestern sub-area, and (c) the seismogram at Jeju station due to the 2004 Sumatra-Andaman Islands Earthquake (SAIE).

산업(SN), 봉성(BS)에서 지진의 영향이 나타났다. DN에서는 약 14.1 cm, SN에서는 약 23.6 cm, BS에서는 약 11.9 cm 만큼 지하수위가 추세선보다 상승하였으나, HG1에서는 약 35 cm, HG3에서는 약 34 cm 만큼 지하수위가 추세선보다 하강하였다(Fig. 7). 한편, 서부 소지역에서는 3개의 지하수공(명월(MY), 용수2(YS2), 상모2(SM2))에서 지진의 영향이 나타났으며, MY에서는 약 8.25 cm, YS2에서는 약 8.98 cm, SM2에서는 약 11.2 cm 만큼 지하수위가 추세선보다 상승하였다. 그러나, 남서부 소지역에서는 모든 지하수공에서 지진에 의한 지하수위 변동이 나타나지 않았다.

3개 소지역간에 지진에 의한 지하수위 변동폭과 비양

수량 및 투수량계수의 관계를 살펴보면, 비양수량과 투수량계수가 가장 큰 북서부 소지역의 지하수위 변동폭이 평균 23.74 cm로서 가장 크게 나타났으며, 두 번째로 서부 소지역의 지하수 변동폭이 9.48 cm로 나타났다. 그러나, 비양수량과 투수량계수가 가장 낮은 남서부 소지역에서는 지하수위 변동이 나타나지 않았다. 지진에 의한 지하수위 상승 또는 하강은 지진에 의한 대수층의 압축과 팽창에서 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 대수층이 압축되어 대수층 내 공극이 감소하면 지하수위가 상승하고, 대수층이 팽창되어 공극이 증가하면 지하수위가 하강하게 된다(Grecksch *et al.*, 1999; Wakita, 1975). 그러나, 지진에 의한 지하수위 변동폭과 비양수

량 및 투수량계수의 관계가 가지는 물리적인 의미에 대해서는 앞으로 보다 깊이있는 고찰이 필요하다.

5. 결 론

제주도 서반부의 대수층 체계를 보면, 북서부 소지역은 대체로 상부 투수층-상부 저투수층-하부 투수층-하부 저투수층으로 구성되고, 서부 소지역과 남서부 소지역은 상부 저투수층-투수층-하부 저투수층으로 구성된다. 연구지역의 주 대수층은 칼링커층, 질리대, 균열대, 용암류와 용암류 사이의 접촉면, 유리쇄설암, 화성쇄설층으로 파악되었다. 북서부 소지역의 투수량계수가 평균 $3,379 \text{ m}^2/\text{day}$, 비양수량은 평균 $4,874 \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$ 로 가장 높으며, 그 다음으로 서부 소지역의 투수량계수가 평균 $2,597 \text{ m}^2/\text{day}$, 비양수량은 평균 $2,185 \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$ 이고, 남서부 소지역의 투수량계수는 평균 $87.7 \text{ m}^2/\text{day}$, 비양수량은 평균 $114 \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$ 로 가장 낮다.

비양수량과 응회암의 산출 고도의 관련성을 보면, 상관계수가 -0.848 으로 비교적 높은 반비례 관계를 보인다. 이는 응회암이 대수층의 밀바닥 역할을 하기 때문으로 판단되며, 응회암의 산출 고도가 비양수량에 중요한 요인이 됨을 지시한다. 서부 소지역과 남서부 소지역의 비양수량과 수위강하는 높은 음의 상관성(상관계수 $R=-0.997$)을 보이며, 북서부 소지역의 비양수량과 수위강하는 서부 소지역과 남서부 소지역에 비해 상대적으로 낮은 음의 상관성(상관계수 $R=-0.779$)을 보인다. 비양수량과 수위강하의 관계는 소지역 별 대수층의 구조적인 차이와 지형고도 등에 영향을 받는 것으로 판단된다. 한편, 지하수공의 지표 해발고도에 따른 비양수량을 보면, 해발고도 100 m 이하의 지하수공과 200~350 m의 지하수공보다 100~200 m에 위치하는 지하수공의 비양수량의 중간값이 크게 나타난다.

2004년 수마트라 지진에 대한 지하수위 변동을 분석한 결과, 북서부 소지역의 5개 지하수공에서 추세선에 대한 평균 지하수위 변동폭이 23.74 cm, 서부 소지역의 3개 지하수공의 평균 지하수위 변동폭은 9.48 cm이었으며, 남서부 소지역의 지하수공에서는 지진의 영향이 전혀 나타나지 않았다. 따라서, 본 연구지역에서 지진에 대한 지하수위 변동과 투수량계수 및 비양수량이 정비례관계를 가지는 것으로 나타났으나, 이의 물리적인 의미에 대해서는 보다 심도있는 고찰이 요구된다. 이와 같이, 본 연구를 통하여 제주도 지역에서 지하수위를 이용한 지진관측이 확인되었으나, 보다 자세한 지진관측을 위해서는 지진관측 전용 지하수공의 확보와

함께 지하수위 관측 간격을 1분 간격으로 줄일 필요가 있다.

사 사

본 연구는 2010년도 기상지진기술개발사업단 과제(CATER 2010-5305)로 수행되었으며, 시추공 지질자료와 양수시험 자료는 제주특별자치도로부터 제공되었다. 또한 익명의 심사자 두 분의 유익한 심사의견에 감사드린다.

참고문헌

- Caporali, A., Braitenberg, C. and Massironi, M. (2005) Geodetic and hydrological aspects of the Merano earthquake of 17 July 2001, *Journal of Geodynamics*, v.39, p.317-336.
- Choi, B.S. (1999) Determination of aquifer characteristics from specific capacity data of wells in Cheju Island, *Journal of Korean Society of Groundwater Environment*, v.6, p.180-187. (in Korean).
- Cuttillo, P.A. and Ge, S. (2006) Analysis of strain-induced groundwater fluctuations at Devils Hole, Nevada, *Geofluids*, v.6, p.319-333.
- Grecksch, G., Roth, F. and Kumpfle, H.J. (1999) Coseismic well level changes due to the 1992 Roermond earthquake compared with static deformation of half space solutions, *Geophysical Journal International*, v.138, p.470-478.
- 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, p.43-53.
- Hamm, S.-Y., Cheong, J.-Y., Jang, S., Jung, C.-Y. and Kim, B.-S. (2005) Relationship between transmissivity and specific capacity in the volcanic aquifers of Jeju Island, Korea, *Journal of Hydrology*, v.310, p.111-121.
- Hamm, S.-Y., Lee, S.-H., Park, Y.-S., Koh, K.-W., Cheong, J.-Y. and Lee, J.-H. (2009) Relationship between earthquake and groundwater change observed in Jeju Island, Korea, *Asia Oceania Geosciences Society(AOGS) 6th Annual Meeting*, Singapore, p.110.
- Itaba, S., Koizumi, N. (2007) Earthquake-related changes in groundwater levels at the Dogo hot spring, Japan. *Pure and Applied Geophysics*, v.164, p.2397-2410.
- Jeju Development Institute (2001) Report on general survey of hydrogeology and groundwater resource (I), Jeju-do Province. 378p. (in Korean).
- Jeju-do and K-water (2003) Report on general survey of hydrogeology and groundwater resource (III), 425p. (in Korean).
- Jeju-do Regional Water Management Division (2001) Geological columnar data of Jeju Island, Jeju-do Province, 987p. (in Korean).
- Jung, C.-Y. (2002) Geology and groundwater of the western coastal area in Jeju Island, doctoral thesis of

- Pusan National University, Korea, 167p.
- 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*, v.327, p.258-275.
- Koh, D.-C., Plummer, L.N., Busenberg, E. and Kim, Y.-J., (2007) Evidence for terrigenous SF₆ in groundwater from basaltic aquifers, Jeju Island, Korea: Implications for groundwater dating, *Journal of Hydrology*, v.339, p.93-104.
- Koh, G.W. (1997) Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implications of the Seoguiipo Formation in Cheju Island, doctoral thesis of Pusan National University, 325p. (in Korean).
- Koh, G.W. (2001) Hydrogeology and groundwater management in Hawaii, Jeju-do Regional Water Management Division, 313p. (in Korean).
- Koizumi, N., Kitagawai, Y., Matsumoto, N., Takahashi, M., Sato, T., Kamigaich, O. and Nakamura, K. (2004) Pre-seismic groundwater level changes induced by crustal deformations related to earthquake swarms off the east coast of Izu Peninsula, Japan, *Geophysical Research Letters*, v.31, L10606, doi:10.1029/2004GL019557.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) and Jeju-do (2004) Establishment of sustainable groundwater supply system in Jeju Island, 214p. (in Korean).
- Lee, K.-S., Koh, D.-C., Lee, D.H., and Park, W.-B. (2002) The temporal and spacial distribution of stable isotope compositions of precipitation in Jeju Island: application to groundwater recharge study, *Journal of the Geological Society of Korea*, v.38, p.151-161. (in Korean).
- Lee, K.-S., Park, W.-B., Hyun, S.-G., Kim, Y.J., Moon, D.-C. and Kim, K.-Y. (2004) Hydrogeochemistry and isotope composition of springs in the southern and northern sides of Mt. Halla, Jeju Island, *Journal of the Geological Society of Korea*, v.40, p.41-52. (in Korean).
- Lee, K.-S., Kim, J.-M., Lee, D.-R., Kim, Y.J. and Lee, D.H. (2007) Analysis of water movement through an unsaturated soil zone in Jeju Island, Korea using stable oxygen and hydrogen isotopes, *Journal of Hydrology* v.345, p.199-211.
- Moench, A.F. (1985) Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storage semiconfining layers, *Water Resources Research*, v.21, p.1121-1131.
- Montgomery, D.R. and Manga, M. (2003) Streamflow and water well responses to earthquakes. *Science*, v.300, p.2047-2049.
- Ohno, M., Sato, T., Notsu, K., Wakita, H. and Ozawa, K. (2006) Groundwater-level changes due to pressure gradient induced by nearby earthquakes off Izu Peninsula, 1997. *Pure and Applied Geophysics*, v.163, p.647-655.
- Park, K.H., Ann, J.S. and Kee, W.-S. (2006) Guidebook for a geological tour of Jeju Island (revised edition), Korea Institute of Geoscience Mineral And Resources., 183p. (in Korean).
- Park, K.H., Cho, D.-L. and Kim, J.C. (2000) Geological map of Korea: Moseulpo-Hanlim, 74p.
- Ramana, D.V., Chadha, R.K., Singh, C. and Shekar, M. (2007) Water level fluctuations due to earthquakes in Koyana-Warna region, India, *Natural Hazards*, v.40, p.585-592.
- Roeloffs, E.A. (1998) Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquake, *Journal of Geophysical Research*, v.103, p.869-889.
- Shih, D.C.-F. (2009) Storage in confined aquifer: Spectral analysis of groundwater responses to seismic Rayleigh waves, *Journal of Hydrology*, v.374, p.83-91.
- Singh, V.S. (2008) Impact of the earthquake and Tsunami of December 26, 2004, on the groundwater regime at Neill Island (south Andaman). *Journal of Environmental Management*, v.89, p.58-62.
- Song, S.T. and Yoon, S. (2002) Lavas in Gotjawal Terrain, Jeju Island, Korea No. 1. Jocheon-Hamdeok Gotjawal Terrain, *Journal of the Geological Society of Korea*, v.38, p.377-389. (in Korean).
- Wakita, H. (1975) Water wells as possible indicators of tectonic strain, *Science*, v.189, p.553-555.
- Wang, C.Y., Wang, C.H. and Kuo, C.H., (2004) Temporal changes in groundwater level following the 1999 (Mw = 7.5) Chi-Chi earthquake, Taiwan, *Geofluids*, v.4, p.210-220.
- Won, J.-H., Lee, J.-Y., Kim, J.-W. and Koh, G.-W. (2006) Groundwater occurrence on Jeju Island, Korea, *Hydrogeology Journal*. v.14, p.532-547.
- Yoon, S. (1997) Miocene-Pleistocene volcanism and tectonics in southern Korea and their relationship to the opening of the Japan Sea, *Tectonophysics*. v.281, p.53-70.
- Yoon, S., Koh, G.-W. and Kim, I.T. (1995) Development history of Jeju Island, *Bulletin of Cheju-do Provincial Government*, v.98, p.148-164. (in Korean).
- Yoon, S., Jung, C.Y., Song, S.-T. and Hyun, W.H. (2003) Mt. Halla in Jeju Island: an uplifted edifice. in *Proceeding of 1st international symposium, Jeju Volcanological Institute*, p.7-14.