

제주도 한천저류지 지표 침투율 평가

서정아¹ · 김용철^{1,*} · 문덕철² · 고기원² · 김용제¹

¹한국지질자원연구원

²제주특별자치도개발공사 물산업연구센터

요 약

2007년 태풍 'NARI'의 하천범람 이후 홍수피해 저감용 저류지가 제주시 주요하천변에 1단계로 건설되었다. 하천변 저류지는 홍수 시 첨두 유출량을 낮춰주고, 첨두수위 이동시간을 지연시켜 줄 뿐 만 아니라 바닥면을 통한 인공함양 역할도 해준다. 본 연구에서는 집중 호우 시 한천 2저류지의 수위자료를 이용하여 저류지의 침투특성을 분석하고자 하였다. 한천 제2 저류지에 자동수위계측기를 설치하여 집중호우시의 수위자료를 획득하였으며, 수위자료를 이용하여 침투율을 평가하였다. 한천 저류지의 수위변화는 강수량에 민감하게 반응하고 수위 회복에 걸리는 시간이 빠르다. 저류지의 침투율은 매 집중호우가 끝나는 시점에서 지속적으로 하강하는 저류지 수위를 부피로 환산한 후, 시간에 따른 저류부피 감소량을 지수감소함수에 최적화하여 추정하였다. 최적화된 지수감소함수의 기울기를 최대 저류부피와 절편으로 표준화시킨 표준기울기를 이용하여 서로 다른 강우사상의 침투율을 비교하였다. 침투율과 비례관계에 있는 표준기울기는 각 강우사상시 저류지의 침투수위 높이에 상관없이 2010년 관측 이후 지속적으로 감소하는 것으로 분석되었다. 이 결과는 저류지 준공 후 초기에 발생한 하천 유출 동안에 저류지 바닥에 쌓인 토사에 의해 저류지 바닥의 침투능력이 감소했기 때문인 것으로 판단된다. 이는 저류지 자체 외에 인공함양에 의한 간접 홍수조절능력이 감소하는 것을 의미하므로 향후 일정 간격으로 저류지 바닥의 토사를 제거하는 유지관리 계획이 필요할 것으로 판단된다. 이 연구는 대규모 저류지와 집중호우시 하천유출수를 활용한 대규모 지표침투시험에 대한 연구로 의미가 있으며, 향후 지표 투수성이 좋은 제주도에서 지표침투식 인공함양을 적용하고자할 때 좋은 지침이 될 것으로 기대된다.

주요어: 지표침투율, 표준기울기, 인공함양, 하천유출, 한천 저류지

Jungah Seo, Yongcheol Kim, Deokcheol Moon, Gi Won Koh and Yongje Kim, 2014, Evaluation of surface infiltration rate in Hancheon reservoir, Jeju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 50, no. 3, p. 419-430

ABSTRACT: Flood mitigation reservoirs were constructed near major stream at upstream of Jeju city after flood damages by heavy rain followed by Typhoon NARI in 2007. The riverside flood mitigation reservoir can lower peak discharge, delay the transfer time of peak level of the stream discharge and act as an artificial recharging facility. In this study, the infiltration rate through the permeable reservoir bottom is evaluated by the analysis of water level changes in the Hancheon reservoir II during flash flood. Water level in Hancheon reservoir fluctuates sensitively according to precipitation and is lowered fast after ceasing the rainfall. Infiltration rate was estimated by fitting to the temporal change of water volume in reservoir which is calculated from the temporal change of water level of the recessing part. Normalized slopes of recessing temporal change of water volume which are slope divided by peak level or intercept are used to compare the infiltration rate change at each events. The normalized slope shows gradual decrease since the first diversion of stream water into the reservoir in 2010 no matter what the height of water level. This is due to the clogging of the bottom by the sediments moved in together with inflowing water from stream. It means weakening of flood mitigation capacity produced indirectly by the infiltration of water into aquifer. Therefore it needs a periodic maintenance for removing soil on the bottom. This study is a first trial to evaluate large-scale infiltration tests naturally performed by large reservoir and stream discharge water during heavy rain, and can give a guideline in applying a spreading method of artificial recharge in Jeju island where the surficial geological unit has high permeability.

Key words: Surface infiltration rate, Normalized slope, Artificial recharge, Stream discharge, Hancheon reservoir

* Corresponding author: +82-42-868-3086, E-mail: yckim@kigam.re.kr

(Jungah Seo, Yongcheol Kim and Yongje Kim, Groundwater Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124, Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Republic of Korea; Deok cheol Moon and Gi Won Koh, Water Industry Research Center, Jeju Special Self-Governing Province Development Corporation, 1717-35, Namjoro, Jocheonup, Jeju 695-961, Republic of Korea)

1. 서론

제주도는 투수성이 좋은 다공질 화산암류 및 화산회토로 이루어져 있어 연평균 강수량이 약 2,000 mm로 내륙에 비하여 많은 비가 내리는 다우지역임에도 불구하고 연중 흐르는 하천이 없으며(Jeju Development Institute, 2008), 선행강수량에 따라 다르지만 일반적으로 40~50 mm이상인 강우사상일 때에만 하천유출이 발생한다(Jeju Special Self-Governing Province, 2003). 유출 지속시간도 2~3일에 불과하여 수자원을 전적으로 지하수에 의존하고 있다. 또한 화산섬으로서 투수성이 매우 양호한 용암류와 화산쇄설물 층들이 여러 겹으로 발달하고 있는 것으로 알려져 있어(Jeju Special Self-Governing Province, 2008), 수문조건, 대수층의 투수성 및 저수성 측면에서 지하수 인공함양에 적합한 수리지질학적 특성을 갖고 있다.

최근에 들어오면서 제주지역에서도 전 세계적인 기후변화 영향으로 인해 강수량의 양극화 현상이 관측되고 있을 뿐만 아니라, 도시의 확장·비닐하우스 시설면적의 증가 등 토지이용 변화가 빠르게 진행되고 있다. 이와 같은 기후 및 토지이용 변화는 지하수 함양량의 불안정성을 가중시킬 수 있는 요인들로서 이에 대응한 적절한 대책이 요구되어지고 있다(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2011a). 제주도는 높은 투수성 때문에 하천범람에 의한 홍수 피해 사례가 없었으나, 예전과 달리 침수 및 재해 위험성이 증가하고 있다. 그 사례로 2007년 9월 태풍 '나리'에 의한 집중호우시 많은 인명과 재산피해를 발생시킨 제주도 주요 하천의 범람을 들 수 있다(Oh *et al.*, 2011; Moon *et al.*, 2012). 이에 대한 유역 분담식 홍수저감 대책으로 제주시는 주요 하천변에 홍수저감용 저류지를 2010년도에 건설하였다. 하천변 저류지는 홍수 시 침투 유출량을 낮춰주고, 침투수위 이동시간을 지연시켜 줄 뿐 만 아니라 바닥면을 통한 인공함양역할도 해준다.

제주도는 지하수의 이동속도가 매우 커 미국 등 세계 여러 국가에서 활발히 이용되는 대수층 주입

회수법(Aquifer Storage Recovery; ASR)처럼 주입된 물을 주입한 곳에서 다시 뽑아 쓰거나, 인공함양을 통한 수자원 확보만을 목적으로 한 저류지를 건설하는 것은 비경제적이다. 그러나 홍수피해 저감을 위한 저류지를 활용한다면, 경제적인 방법으로 수자원 확보를 위한 인공함양도 가능하다. 그런 의미에서 제주시를 관통하는 주요 하천변에 설치된 홍수저감용 저류지의 바닥면을 통한 인공함양은 수자원 확보와 유출수의 지하 침투를 통해 간접적으로 저류지의 홍수 유출수 처리용량을 늘리는 역할을 한다. 제주도의 수문학적, 수리지질학적, 지리학적 특성을 고려한 홍수저감용 저류지 연계 대수층 인공함양은 불포화대 화산암 대수층을 대상으로 하는 세계적으로 드문 사례이다(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2011a).

따라서 제주 화산섬의 수리지질 특성에 맞는 제주 친화형 지하수 인공함양 기술을 개발함과 아울러, 기후 변화에 따른 극단적 가뭄과 제주도의 물 수요 증가에 능동적으로 대처할 수 있는 기반기술을 확보할 필요가 있다. 지하수가 기후변화에 대응할 수자원 확보 방법이 되기 위해서는 인위적으로 양질의 지하수자원을 증가시킬 수 있는 인공함양 기술의 도입이 필요하다. 앞으로는 기후변화에 변동성이 상대적으로 작은 지하수 자원 및 지하공간을 활용한 인공함양과 같은 수자원 공급 방안이 수자원공급시스템의 보조수단으로서 그 중요성이 커질 것이다(Kim and Kim, 2010).

전 세계적으로 인공함양용 침투 저류지는 보통 투수성의 충적층을 대상으로 한 사례가 많지만(Bouwer, 2002; Pyne, 2005), 제주도와 같이 클링커 등의 투수성 화산구조를 갖는 암반 저류지를 통한 인공함양에 대해서는 연구된 사례가 없다. 본 연구에서는 제주도 소재 한천 저류지의 수문특성 분석하고, 집중 호우 시 한천 2저류지의 수위자료를 이용하여 저류지의 침투특성 분석을 통해 인공함양 특성을 평가하고자 하였다. 대상지역은 하류지역에 시가지가 발달해 있어 타 지역보다 안정적인 물 공급이 요구되고 있을

뿐만 아니라, 지속적인 도시지역 면적의 확장으로 지하수함양 가능지역이 지속적으로 감소되고 있으며, 태풍 나리에 의한 집중호우시 한천범람으로 인한 많은 인적/물적 피해가 발생했던 한천 유역에 설치된 가장 큰 규모의 저류지 2개소를 대상으로 하였다.

2. 연구방법

2.1 한천유역 수문특성

한천유역은 해발고도 1,950 m의 한라산 북쪽 정상부에서 발원하여 탐라교육원 동쪽 오라컨트리 골프장-용담동 해안으로 유하하는 하천으로, 해발 275~370 m 지역에 총 2개의 저류지가 설치되어 있다(그림 1a). 한천의 해안유출지점을 중점으로 하는 유역은 한천1 유역으로 명명하였고, 탐라교가 있는 곳을 중점으로 하는 유역은 한천2 유역으로 명명하였다. 한천1 유역은 면적 35.01 km², 최대유하거리 19.95 km, 유역 평균 폭 1.75 km이며, 한천 2유역은 면적 10.11 km², 최대유하거리 8.4 km, 유역 평균 폭 1.2 km이다.

한천을 포함한 대부분의 제주도 하천은 평상시에는 건천으로 있다가 집중호우 시에만 일시적으로 유출이 발생하는 간헐천으로, 강우량의 대부분이 7~9월에 집중된다. 한천1 유역의 하천유출을 발생시킨 평균 유효 강수량은 66 mm이고 유출지속시간은 평

균 14.1시간이며, 유출이 발생한 후 최고수위까지 도달시간은 평균 1.8 시간이다. 한천2 유역에서 하천유출을 발생시킨 평균 유효강수량은 78 mm이고, 유출지속시간은 평균 12.0시간이며, 유출이 발생한 후 최고수위까지 도달시간은 평균 2.5 시간이다(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2011a). 유출을 발생시키는 유효 강수량이 상류인 한천2 유역에서 큰 이유는 측정지점을 기점으로 상류의 유역면적이 넓어서 유출을 발생하기 위해 더 많은 강수량을 필요로 하기 때문이다. 유출지속시간은 하류인 한천1 유역이 상류보다 크게 나타나는데, 이는 상류지역부터 하천 유출 공급원이 감소하기 때문이다. 최고수위 도달시간이 하류인 한천1 유역에서 빠른 것은 주변에서 하천으로 유입되는 지표유출수 외에 상류에서 공급되는 하천유출수가 더해지기 때문이다.

제주특별자치도 수자원본부에서는 한천의 유출량을 파악하기 위해 표고 35 m 지점(한천1), 한천 제2저류지 유입구 인근 지점(한천2)에 각각 하천유출량 관측소를 설치·운영 중에 있다(그림 1a). 2008년부터 2010년까지 3년간의 유출사상에 대한 유출량 분석결과, 한천1 지점의 총 유출량은 4,304×10³ m³으로 전체 수문총량의 36%이고, 한천2 지점의 총 유출량은 2,646×10³ m³으로 전체 수문총량의 45%이다(Moon *et al.*, 2014). Moon *et al.* (2014)의 연구

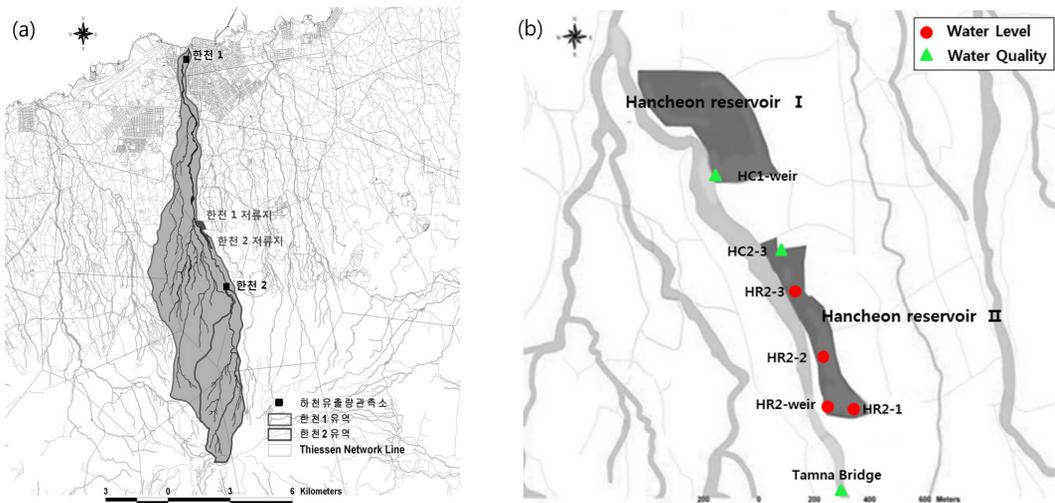


Fig. 1. (a) Location of the Hancheon reservoirs in Jeju Island. (b) The monitoring sensors for water level are installed in Hancheon stream and reservoirs.

Table 1. The number of rainfall events producing inflow into the Hancheon reservoirs II.

Name	Total number of inflow (times)			Total consecutive time (hour)		
	2010	2011	2012	2010	2011	2012
HR2-Weir	7	2	8	62.6	34.5	42.3
Hancheon reservoir II	HR2-1	6	2	103.3	50.2	64.8
	HR2-2	5	2	n-a	47.2	n-a
	HR2-3	1	n-i	n-i	3.7	n-i

(1) n-a: 'not available' due to lost of sensors.
 (2) n-i: no inflow.

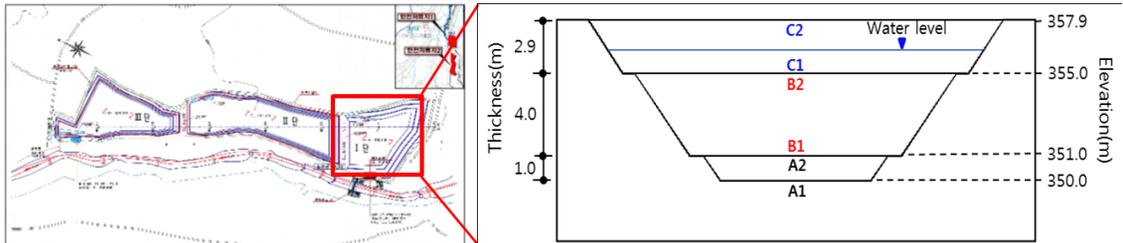


Fig. 2. A plan view (left) and a sectional view (right) of the upper sector in the Hancheon reservoir II. The water level is distance from bottom to depth to water level.

에 의하면 제2저류지에서의 10분당 최대 유입량은 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 이고, 제2저류지 하류에 위치한 제1저류지의 10분당 최대 유입량은 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 으로, 제2저류지에는 유출수의 25.2%가 유입되고, 제1저류지에는 11.7%가 유입되었다. 한천은 연중 유출일수가 짧은 간헐적이지만, 홍수 유출시 발생하는 하천유출물은 수문 총량의 36~45%로 제주도 전체의 평균 직접유출률인 24.1%(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2011b)에 비해 매우 커서 인공함양하기에 좋은 조건을 갖고 있다.

2.2 침투속도 측정방법

2010년 7월 13일부터 2012년 9월 17일까지 집중 호우시에 한천 제2저류지에 자동 수위계측기를 설치하여 10분 간격으로 자료를 획득하였다. 한천 제2저류지는 저류용량이 $4.53 \times 10^5 \text{ m}^3$ 이고, 큰 지형구배로 인해 3단으로 건설되었으며 각 단마다 수위 계측기를 설치하였다(그림 1b). 강수량이 일정량 이상이 여야 유출이 발생하고 유출지속시간도 짧게 나타나는 제주도의 특성상 유출이 발생하여 저류지로 유출수가 유입된 기간의 저류지 수위자료만을 분석에 이용하였다. 한천 저류지의 연도별로 유입 및 유출 횟수와 지속시간은 각기 다르며(표 1), 각각의 유입을

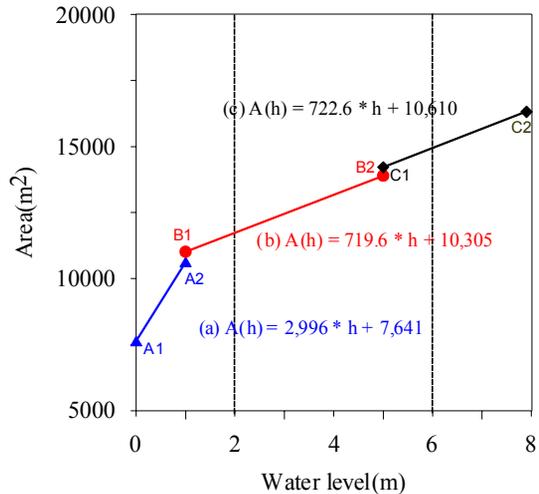


Fig. 3. Calculated function for the water surface area in the upper sector of the Hancheon reservoir II according to the water levels between 0 m and 1 m (left line), 1 m and 5 m (center line), and 5 m and 7.9 m (right line).

시간대와 지속시간을 고려한 후 취합하여 강우사상으로 표현하였다.

수위자료는 가장 많은 강우 사상에서 수위변화 자료를 갖고 있는 한천 제2저류지의 상단에 설치한 HR2-1 지점의 수위자료를 이용하였다. 저류지는 바닥에서 상부로 갈수록 넓어지는 구조를 갖고 있어서

Table 2. Characteristics of the stream water inflow into the Hancheon reservoir II during 2010 to 2012.

Year	HR2-Weir				HR2-1			HR2-2			HR2-3			Note
	inflow time	inflow rate (10 ³ m ³)	Max. w-l* (m)	inflow time (hr)	inflow time	Max. w-l* (m)	infiltration time (hr)	inflow time	Max. w-l* (m)	infiltration time (hr)	inflow time	Max. w-l* (m)	infiltration time (hr)	
2010	7-13 08:50	70.21	0.46	7.8	7-13 08:50	1.48	16.7	7-13 11:00	0.27	6.3				event1
	7-14 01:20	12.55	0.25	3.7	7-14 01:30	0.71	7.7							
	7-28 02:30	181.6	1.05	1.1	7-28 02:40	4.77	11.2	7-28 03:00	0.69	8.2				event2
	8-10 12:40	690.1	1.20	27.5	8-10 12:50	6.79	35.0	8-10 13:00	2.56	31.7				event3
	8-25 23:20	20.28	0.32	3.7	8-25 23:40	3.22	11.3	8-25 23:50	0.45	6.7				event4
	8-28 01:00	107.3	0.64	5.3	8-28 02:20	6.91	21.5	8-28 03:10	3.11	16.8				
	8-28 06:30	524.5	0.93	13.5				8-28 04:30	1.71	5.2	8-28 08:50	0.16	3.7	
2011	6-25 15:30	318.9	1.02	15.5	6-25 15:40	5.46	24.7	6-25 15:50	2.17	26.3				event1
	8-7 09:30	849.7	1.34	19.0	8-7 09:40	6.66	25.5	8-7 11:10	4.63	20.8				event2
2012	4-21 09:10	143.1	0.58	8.7	4-21 09:40	2.05	12.3							event1
	4-25 07:50	29.24	0.33	3.3	4-25 08:20	0.97	6.5							event2
	7-18 20:00	11.46	0.29	3.8										
	8-23 17:10	8.896	0.34	1.2										event3
	8-24 01:50	6.478	0.23	1.5										
	8-27 21:50	33.39	0.50	2.2	8-27 22:30	6.18	21.5							
	9-16 18:40	5.714	0.16	15.0										event4
9-17 02:30	159.6	0.75	6.7	9-17 02:40	6.71	24.5								

* w-l : water level

저류지 수위에 따라서 저류부피를 불연속적으로 계산해야한다. 한천 제2 저류지 고도에 따른 저류지 단면적은 설계도를 참고하였다(그림 2). 시간에 따른 저류지의 부피변화는 시간에 따른 저류지 수위와 그 수위에 상응하는 단면적의 곱을 바닥에서부터 수위 높이까지 누적하여 계산하며 이를 식으로 나타내면 다음의 식 (1)로 표현된다.

$$V(t) = \int_{h=0}^{h(t)} \{A(h)dh\} \quad (1)$$

여기서, V(t)는 시간에 따른 저류지 부피이고, h(t)는 시간에 따른 저류지 수위, A(h)는 저류지내 수위에 따라 변하는 수면의 면적이다. 식 (1)을 시간으로 미분하면 침투율(I)을 알 수 있다(식 (2)).

$$I(m^3/min) = \frac{dV(t)}{dt} \quad (2)$$

저류지 수위자료 중에 저류지내로 유입이 발생하지 않는 시점부터 이후의 자료만을 이용하여 침투율을 계산하였으며, 이 구간의 $h(t)$ 는 정점에서 지속적으로 감소하며 그 변화 형태가 지수함수로 감소하므로 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$h(t) = \alpha \cdot e^{-\beta \cdot t} \quad (3)$$

여기서, α 와 β 는 수위감소 곡선에 최적화된 계수이다.

저류지 수위에 따른 수면 면적과 저류부피를 계산하기 위해 저류지 수위를 10 cm간격으로 구분하였다. 수위 변화에 따른 저류지 수면 면적식 산정에 이용한 저류지 HR2-1의 위치와 단면도는 그림

2와 같다. HR2-1 센서가 설치된 한천 제2저류지 상단은 고도가 350.0~357.9 m이며, 고도 350.0 m일 때의 수위는 0 m이며, 357.9 m일 때의 수위는 7.9 m로 7.9 m이상의 물은 하류에 위치한 중단으로 월류된다. 때문에 수위에 따른 넓이의 변화는 최대 7.9 m까지 나타낼 수 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 저류지 사면의 기울기가 3단계로 증가하며, 각 단계는 선형으로 증가하므로 수면 면적식은 수위에 대한 일차방정식으로 표현할 수 있다. 저류지 각 단계 구간의 최소면적과 최대면적을 이용하여 세 개의 수면 면적식을 구하였다. 수위에 따른 면적식은 그림 3과 같고, 1단계인 0.0~1.0 m 구간에서는 $A(h) = (2,996 \times h) + 7,641$ 으로, 2단계인 1.01~5.0 m 구간에서는 관계식 $A(h) = (719.6 \times h) + 10,305$ 으로, 3단계인 5.01~7.9 m 구간에서는 관계식 $A(h) = (722.6 \times h) + 10,610$ 으로 계산되었다.

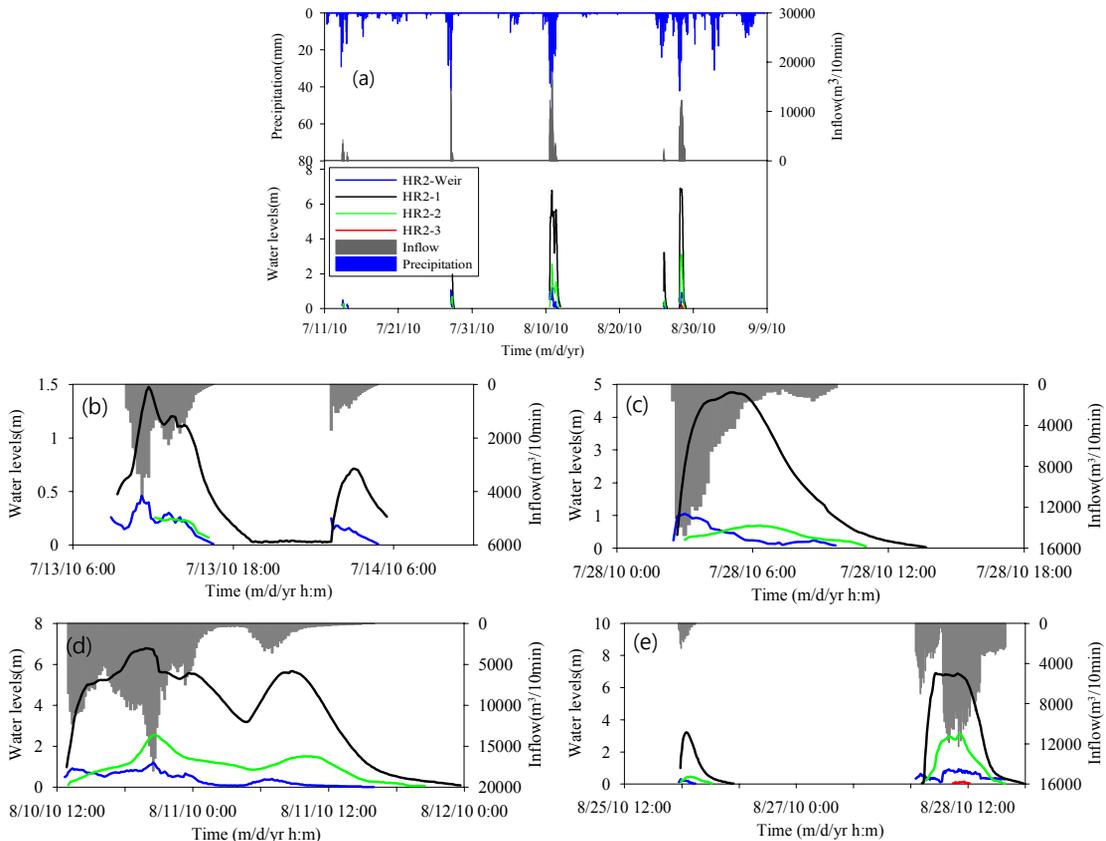


Fig. 4. Time series data of water levels, inflow amount and precipitation in the Hancheon reservoir II in 2010 (a) and the selected period for the calculation for the event 1 (b), event 2 (c), event 3 (d), event 4 (e).

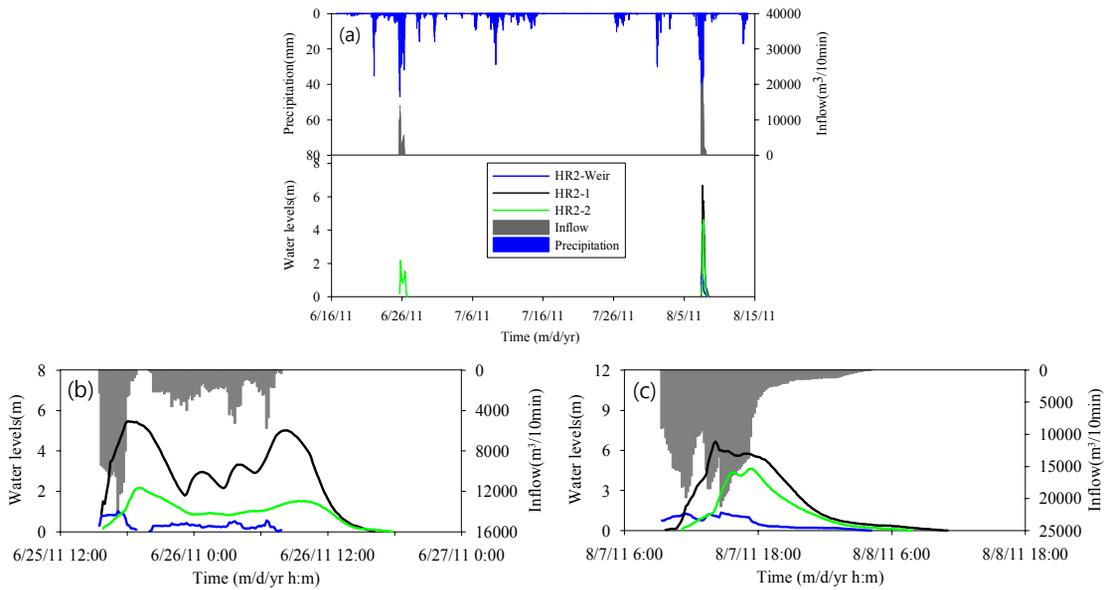


Fig. 5. Time series data of water levels, inflow amount and precipitation in the Hancheon reservoir II in 2011 (a) and the selected period for the calculation for the event 1 (b), event 2 (c).

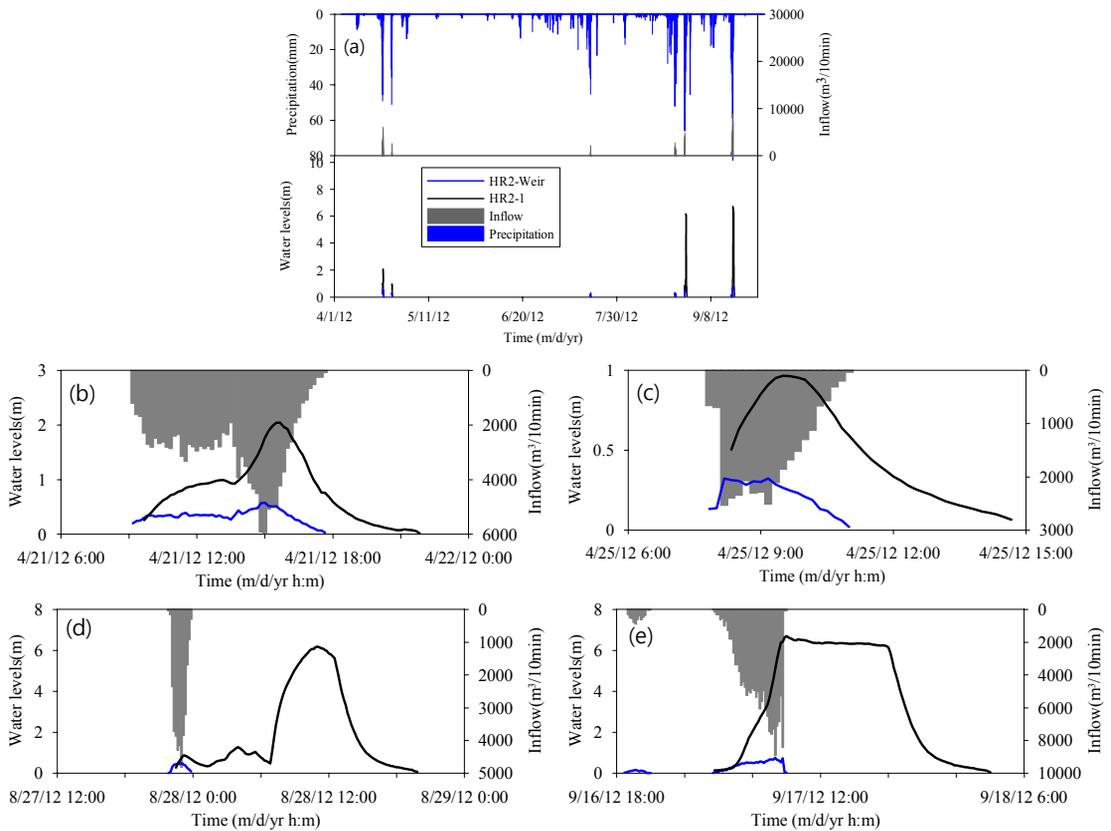


Fig. 6. Time series data of water levels, inflow amount and precipitation in the Hancheon reservoir II in 2012 (a) and the selected period for the calculation for the event 1 (b), event 2 (c), event 3 (d), event 4 (e).

3. 결과 및 토의

3.1 저류지 수위 변동 특성

분석에 이용한 2010년부터 2012년 동안 제주도 한천 제2저류지의 수위 자료는 그림 4에서 그림 6에 도시하였다. 그림 4는 2010년 한천 제2저류지의 수위자료를 도시한 결과로, 유출 발생시간과 지속시간을 고려하여 총 4번의 강우사상으로 취합하여 분석하였다. 4번의 강우사상동안 총 $1,607 \times 10^3 \text{ m}^3$ 의 유입이 발생하였으며, 최대 유입량은 $690.1 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이며, 최소 유입량은 $12.55 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이다(표 2). 첫 번째부터 세 번째 강우사상에서는 한천 제2 저류지의 월류보(HR2-Weir), 상단저류지(HR2-1), 중단 저류지(HR2-2)에 유입이 발생했으며, 네 번째 강우사상은 유입량이 많아 하단 저류지(HR2-3)까지 유입이 발생하였다.

2011년도 한천 제2저류지의 수위변화를 도시한 결과 유입횟수는 총 2회로 $1,169 \times 10^3 \text{ m}^3$ 의 유입이 발생하였으며, 최대 유입량은 $849.7 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이고 최소 유입량은 $318.9 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이다(표 2). 유입횟수가 적지만 유입량이 많아 HR2-Weir, HR2-1, HR2-2에서

수위변화가 관측되었고, 2010년의 수위변화와 비교했을 때 HR2-2의 수위변화 폭이 크게 나타남을 알 수 있다(그림 5).

2012년도 한천 제2저류지의 수위 변화를 그림 6과 같이 나타내었으며, 총 4회의 강우사상으로 구분되었다. 총 유입량은 $397.8 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이며, 최대 유입량은 $159.6 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이고 최소 유입량은 $5.714 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이다(표 2). 유입량이 많지 않아 HR2-Weir를 지나 HR2-1까지 유입이 있었으며, HR2-2와 HR2-3에서는 유입이 없어 수위변화가 나타나지 않았다.

유입량과 수위변화를 통해서 월류보를 지난 후 상단에서 하단으로 갈수록 수위변화가 작아짐을 확인하였다. 또한 한천 제2저류지는 HR2-Weir에서 HR2-3까지 도달하는 시간지연이 작으며, 이는 유출수가 상류인 한천 제2저류지를 먼저 채우고 하류로 이동하여 하류인 한천 제1저류지에 도달하는 유출수의 양이 적어지기 때문인 것으로 판단된다. 2010년부터 2012년까지의 수위변화 관측 결과, 제주도는 지질 및 유입 지속시간이 짧은 특성상 수위 변화가 크지 않음을 알 수 있었다. 또한 한천 저류지의 수위

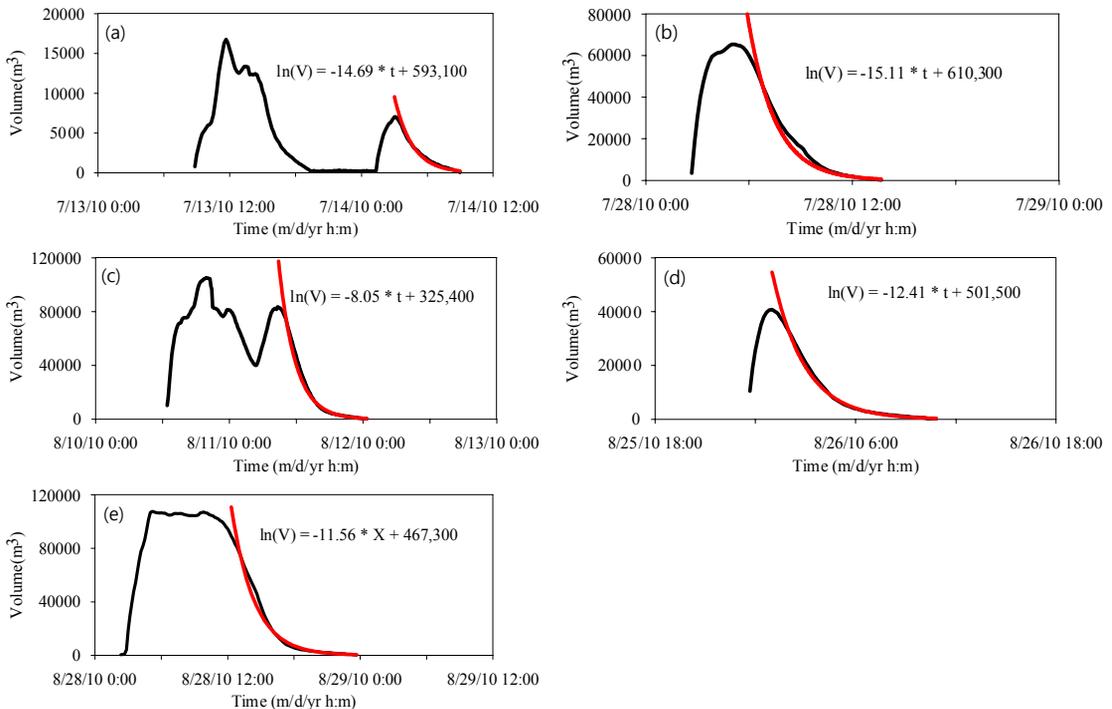


Fig. 7. Water volume change with time in the upper sector of the Hancheon reservoir II in 2010; (a) event 1, (b) event 2, (c) event 3, (d) event 4-1, (e) event 4-2.

Table 3. Change of water volume with time in the upper sector of the Hancheon reservoir II during water level decrease from peak of each rainfall event.

year	event	⁽¹⁾ volume change relation ln(V)= α · t + β		peak volume (m ³)	⁽²⁾ normalized slope 1 (×10 ⁻⁵)	⁽³⁾ normalized slope 2
		α	β (×10 ⁵)			
2010	1	-14.69	5.931	7.050×10 ³	2.477	2.08×10 ⁻³
	2	-15.11	6.103	6.539×10 ⁴	2.476	2.31×10 ⁻⁴
	3	-8.05	3.254	8.347×10 ⁴	2.474	9.64×10 ⁻⁵
	4-1	-12.41	5.015	4.076×10 ⁴	2.475	3.04×10 ⁻⁴
	4-2	-11.56	4.673	1.070×10 ⁵	2.474	1.08×10 ⁻⁴
2011	1	-20.24	8.241	7.085×10 ⁴	2.456	2.86×10 ⁻⁴
	2	-7.50	3.055	1.027×10 ⁵	2.455	7.30×10 ⁻⁵
2012	1	-17.97	7.370	2.415×10 ⁴	2.439	7.44×10 ⁻⁴
	2	-14.43	5.920	1.014×10 ⁴	2.437	1.42×10 ⁻³
	3	-14.80	6.091	9.306×10 ⁴	2.430	1.59×10 ⁻⁴
	4	-12.49	5.144	1.039×10 ⁵	2.428	1.20×10 ⁻⁴

⁽¹⁾unit: t[min], V[m³], normalized slope[1/min]

⁽²⁾normalized slope 1 = -(slope/intercept)

⁽³⁾normalized slope 2 = -(slope/peak volume)

변화는 강수량에 민감하게 반응하고 수위 회복에 걸리는 시간이 24시간 내로 비교적 빠르며, 이는 화산섬인 제주도의 고투수성 지질 특성이 잘 반영된 것으로 판단된다.

3.2 침투율 분석 결과

그림 7에서 그림 9는 시간에 따른 수위변화와 이에 따른 저류부피 변화 식 (2)로 계산하여 연도별로 도시한 그림이다. 시간에 따른 수위변화에 저류지 면적 변화의 중앙값을 적용하였기 때문에, 수위변화 그래프처럼 강우사상별 시간에 따른 부피변화를 도시할 수 있다. 그림 7의 네 번째 강우사상에는 두 번의 수위변화가 관측되어 강우사상을 4-1과 4-2로 나누어 분석하였다.

비가 그치고 수위가 최고점을 지난 후 더 이상의 저류지 내로 유입이 없는 상황에서 시간에 따른 저류부피 변화 자료에 시간에 따른 지수감소식으로 최적화하여 획득한 시간에 따른 저류부피 변화식은 표

3과 같다. 시간에 따른 저류부피 변화식은 저류지 기저면을 통한 지하 침투율을 의미한다. 이때 저류지의 상단, 중단, 하단을 연결하는 상시 배수구를 통한 배수량을 고려하지 않았기 때문에 실제 저류지 기저면을 통한 침투율은 이보다 작을 것이다. 그렇지만 배수구의 위치와 크기가 일정하고 매 강우사상마다 침투수위 차가 크지 않으므로 배수구를 통한 배수량의 차이를 무시할 있다고 충분히 가정할 수 있다. 따라서 이 식들은 강우사상간 침투율 변화를 비교하는데 충분한 자료가 된다.

그러나 표 3에서 저류부피 변화식의 절편은 각 강우사상의 침투수위에서의 저류부피와 관련이 있으며, 이는 또한 강우강도 및 지속시간에 따른 저류지 유입량과 관계가 있다. 또한 저류부피 변화식에서 기울기는 저류지 기저면을 통한 침투율과 관련이 있으며 절편 즉 최고점 저류부피가 클수록 초기 수압이 높아 침투율이 커진다. 따라서 서로 다른 강우강도, 강우 지속시간, 침투수위를 갖는 강우사상에 대

해 침투율을 비교하기 위해서는 저류부피 변화식의 기울기(침투율과 비례하는 변수)를 침투수위시 최대 저류부피 또는 절편으로 정상화해줄 필요가 있다. 각 강우사상의 기울기를 절편으로 나누어 정상

화한 기울기를 표준기울기1, 최대 저류부피로 나누어 정상화한 기울기를 표준기울기2로 정의하고 이 두 가지 기울기를 이용하여 강우사상별 침투율 변화를 비교하였다.

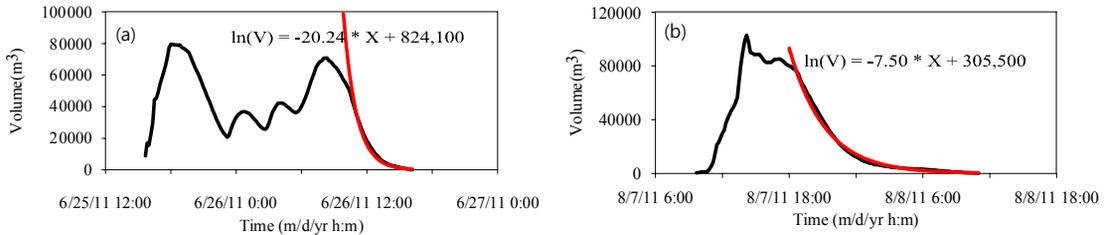


Fig. 8. Water volume change with time in the upper sector of the Hancheon reservoir II in 2011; (a) event 1, (b) event 2.

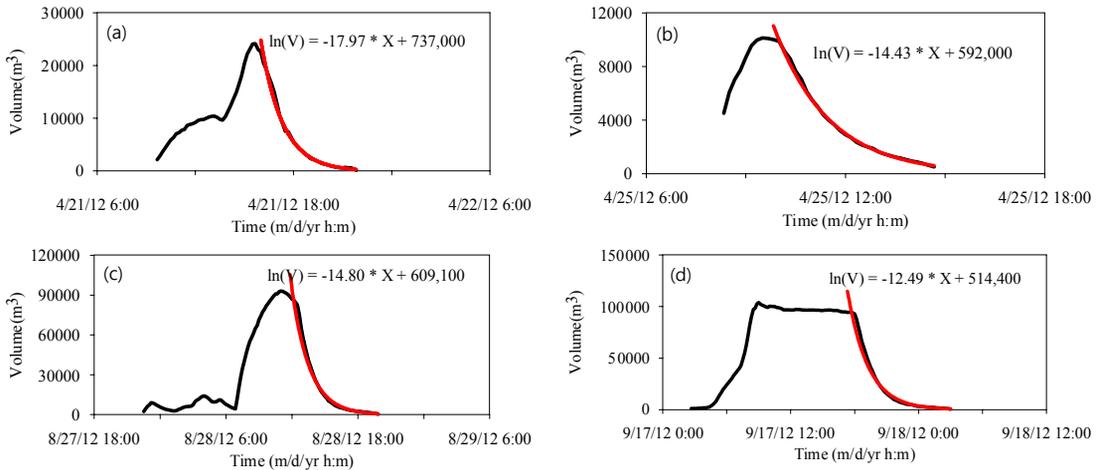


Fig. 9. Water volume change with time in the upper sector of the Hancheon reservoir II in 2012; (a) event 1, (b) event 2, (c) event 3, (d) event 4.

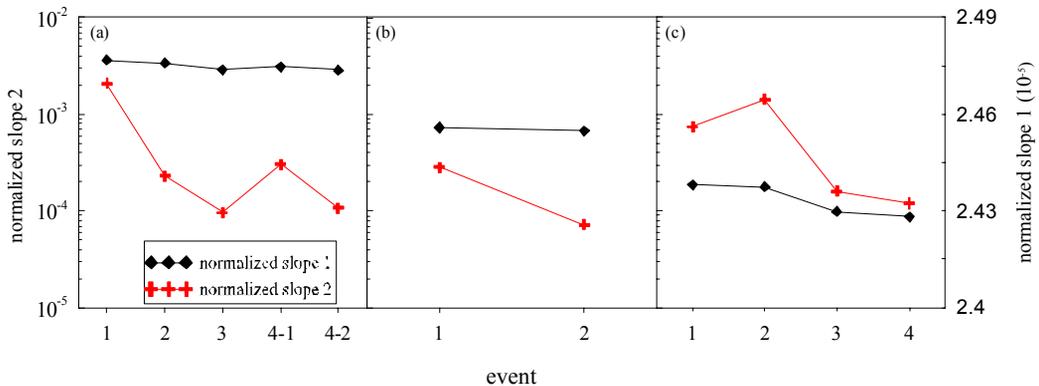


Fig. 10. Change of the normalized slope 1 and 2 with time since 2010 in terms of each rainfall events; (a) 2010, (b) 2011, (c) 2012.

그림 10에서 보는바와 같이 표 3의 표준기울기1과 표준기울기2는 각 강우사상시 저류지의 최대 저류부피에 상관없이 2010년 관측 이후 지속적으로 감소하는 것으로 분석되었다. 이 결과는 저류지 준공 후 초기에 발생한 하천 유출 동안에 저류지 바닥에 쌓인 토사에 의해 저류지 바닥의 침투능력이 감소했기 때문인 것으로 판단된다. 이는 저류지 자체 외에 인공함양에 의한 간접 홍수조절능력이 감소하는 것을 의미하므로 향후 일정간격으로 저류지 바닥의 토사를 제거하는 유지관리 계획이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

제주시 소재 한천 저류지 유역의 수문특성을 분석하고, 집중 호우 시 한천 2저류지의 수위자료를 이용하여 저류지의 침투특성 분석을 통해 인공함양 효과를 평가하고자 하였다. 유출을 발생시키는 유효강수량이 상류인 한천2 유역에서 큰 이유는 측정지점을 기점으로 상류의 유역면적이 넓어서 유출을 발생하기 위해서 더 많은 강수량을 필요로 하기 때문이다. 유출지속시간은 하류인 한천1 유역이 상류보다 크게 나타나는데, 이는 상류지역부터 하천 유출 공급원이 감소하기 때문이다. 최고수위 도달시간이 하류인 한천1 유역에서 빠른 것은 주변에서 하천으로 유입되는 지표유출수 외에 상류에서 공급되는 하천유출수가 더해지기 때문이다. 한천은 비록 연중 유출일수가 짧은 간헐적이긴 하지만, 홍수 유출시 발생하는 하천유출률은 수문 총량의 36~45%로서, 제주도 전체의 평균 직접유출률인 24.1%와 비교하면 인공함양하기에 좋은 조건을 갖고 있다.

한천 제2 저류지의 상단의 저류수위 자료로부터 추정된 시간에 따른 저류부피변화식의 기울기를 최대 저류부피와 절편으로 정상화시킨 표준기울기를 이용하여 서로 다른 강우사상시의 침투율을 비교한 결과 침투속도와 비례 관계에 있는 표준기울기는 각 강우사상시 저류지의 침투수위 높이에 상관없이 2010년 관측 이후 지속적으로 감소하는 것으로 분석되었다. 이 결과는 저류지 준공 후 초기에 발생한 하천 유출 동안에 저류지 바닥에 쌓인 토사에 의해 저류지 바닥의 침투능력이 감소했기 때문인 것으로 판단되며, 이에 대한 유지관리 계획이 필요할 것으로 판단된다.

이 연구는 대규모 저류지와 집중호우시 하천유출수를 활용한 대규모 지표침투시험에 대한 연구로 의미가 있으며, 향후 지표 투수성이 좋은 제주도에서 지표침투식 인공함양을 적용하고자할 때 좋은 지침이 될 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기술혁신C05)에 의한 '수변지하수활용고도화' 연구단 및 21세기 프로티어연구 개발 사업인 수자원의 지속적확보 기술개발 사업단의 연구비 지원(과제번호 3-2-3)에 의해 수행되었습니다. 논문의 질적 향상을 위해 조언을 해주신 익명의 심사위원과 이진용 편집위원님과 기원서 편집위원장님께 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Bouwer, H., 2002, Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeol. J.*, 10, 121-142.
- Jeju Special Self-Governing Province, 2003, A Report on hydrogeological characteristics and groundwater resources total investigation for Jeju Island (3). 175 p (in Korean).
- Jeju Special Self-Governing Province, 2008, A Report on Construction for Hancheon reservoir. 2-16 (in Korean).
- Jeju Development Institute, 2008, Basic research on hydrologic and water quality characteristic for application plan of river outflow. 1-2 (in Korean).
- Kim, Y.C. and Kim, Y.J., 2010, A review on the state of the art in the management of aquifer recharge. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 521-533 (in Korean with English abstract).
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2011a, Application of Analysis Technique and Modeling for Coupled Groundwater-Surface Water Flow System. Sustainable Water Resources Research Center Technical Report, 2011-04, 49-65, 128-143 (in Korean).
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2011b, Assessment of sustainable groundwater availability and development of high value added groundwater in Jeju Island : supplement. 553 p (in Korean).
- Moon, D.C., Jung, K.S., Park, W.B., Koh, G.W. and Kim, Y.C., 2012, Analysis of the flood alleviation effect by the Han Stream reservoir operation. Research Conference of the Korea Water Resources Association (Abstract),

- Jeongseon, May 17-18, 858-861 (in Korean).
- Moon, D.C., Jung, K.S., Park, W.B. and Kim, Y.C., 2014, An Evaluation of the Flood Control Effect according to the Hancheon Reservoir Operation. J. Korea Water Resources Association, 47(2), 107-117 (in Korean with English abstract).
- Oh, S.H., Kim, Y.C. and Koo, M.H., 2011, Modeling Artificial Groundwater Recharge in the Hancheon Drainage Area, Jeju island, Korea. Soil and Groundwater Environment, 16(6), 34-45 (in Korean with English abstract).
- Pyne, R. and David, G., 2005, Aquifer storage recovery: A guide to groundwater recharge through wells. 2nd ed., ASR Systems LLC, Florida, U.S.A, ISBN 0-9774337-090000.

투 고 일 : 2014년 5월 22일

심 사 일 : 2014년 5월 27일

심사완료일 : 2014년 6월 23일