

## 지하수 인공함양을 위한

## 제주도 하천의 홍수 유출 특성 분석



김용철 ▶▶▶  
한국지질자원연구원 선임연구원  
yckim@kigam.re.kr



문덕철 ▶▶▶  
제주특별자치도 환경자원연구원 연구원  
waterfeel@jeju.go.kr



김용제 ▶▶▶  
한국지질자원연구원 책임연구원  
yjkim@kigam.re.kr

170만년의 제주도 지질역사에서 알 수 있듯이 제주도 하천은 매우 젊은 원시하천의 모습을 갖고 있다. 용암류의 흐름의 단절에 의해 생긴 절벽이 하상 곳곳에서 볼 수 있고, 대부분의 하상 매질은 투수성이 좋은 조립질의 모래 이상의 분급을 갖는 퇴적물과 암반전석들로 구성된다. 여름철 장마 및 태풍에 동반한 집중호우때 발생하는 홍수 유출은 그 에너지가 매우 커서 매 홍수유출때마다 하상퇴적물은 물론 집체만한 암반 전석의 위치를 바꾸어 놓기도 한다. 이처럼 제주도 하천은 홍수 유출동안에 접근하기가 어렵고 위험하여 그 동안 많은 연구가 진행되지 못했다.

제주도의 총 강수량은 36억 900만 $m^3$ /년이다. 총 강수량 중에서 증발산량은 12억 1600만 $m^3$ /년(33.7%)이고, 지하수 함양량은 16억 5300만 $m^3$ /년(45.8%)이며, 직접유출을 통해 손실되는 양은 7억 4000만 $m^3$ /년(20.5%)이다. 주로 여름철에 발생하는 홍수유출의 연간 지속시간은 비록 짧지만 이로 인해 하천을 통해 바다로 버려지는 물은 연간 7억톤이 넘는다. 총강수량에서 자연함양되는 지하수가 제주도 수자원의 98%를 차지하고 있는 요즘, 그리고 산업의 발달로 날로 증가하는 수요량과 기후변화로 인해 감소하고 있는 자연함양량을 생각하면 이렇게 하천을 흘러 바다로 사라지는 홍수 유출수의 활용을 심각하게 고려해야 한다.

2007년 9월 태풍 '나리' 때 집중호우로 제주도는 기록역사 이래 처음으로 인구의 절반이 모여 있는 제주시를 가로지르는 4대하천의 곳곳이 범람하여 많은 재산피해와 인명피해를 입었다. 제주시는 향후 발생

## 1. 서언

제주도는 연평균 강수량이 2000mm에 달하는 많은 비가 내리는 지역임에도 불구하고 급한 지형경사 및 투수성 지표지질 특성으로 인해 연중 물이 흐르는 상시하천은 없다. 외도천 최상류와 최하류, 강정천 최하류, 돈내코, 쇠소깍 등 하천의 아주 일부구간에 용천수에 기인한 상시하천이 형성된 것이 전부다. 해안 지역을 제외하고 지하수면은 하천의 하상면보다 매우 낮은 곳에 형성되어 대부분의 하천이 손실하천이다.

할 이와 같은 홍수 피해를 저감하고자 하천 중상류에 홍수저감용 저류지를 계획하고 2008년 8월 착공에 들어갔고 2009년 10월 현재 일부저류지가 완공된 상태다. 또한 21세기 프론티어 수자원의 지속적 확보 기술개발사업상하 지하수-지표수 연계 순환/유동 해석 기술 실용화 사업의 일환으로 제주도 하천유출수를 활용한 지하수 인공함양 연구가 2007년 4월부터 진행되고 있다. 제주도에 적합한 지하수 인공함양 기술을 개발하고 적용하는 이 사업은 한천 제2 홍수피해 저감 저류지(이하 한천 제2 저류지)와 연계하여 사업을 추진하고 있다.

## 2. 제주친화형 대수층 인공함양 기술

제주친화형 대수층 인공함양 기술(J-ART; Jeju-friendly Aquifer Recharge Technology)는 홍수 유출수의 일부를 저류지로 우회시킨 후 저류지내에 설치된 함양정을 통해 땅속으로 주입하는 기술이다 (김용철, 김용제, 2009; 한국지질자원연구원, 2008). J-ART는 제주도의 수문학적, 지질학적 그리고 수리 지질학적인 특성에 기반하여 설계 되었다.

수문학적인 측면에서 보면 제주도는 섬 가운데 위치한 한라산 고지대로 갈수록 연중 강수량이 3000mm까지 증가하여 풍부한 강수량을 갖고 있고, 홍수유출 시간은 짧지만 많은 양의 물이 흘러 하류지역의 자연함양 및 생태환경에 영향을 주지 않으면서도 인공함양에 충분한 많은 물을 취수할 수 있는 여건을 갖고 있다.

제주도는 170만년전부터 수많은 화산활동에 의해 형성된 화산섬이고, 그 동안 많은 용암흐름과 화산분출로 많은 지질학적 구조를 갖고 있다. 용암의 흐름 경계면에서 생기는 깨진 용암경계층인 클링커(clinker)층, 수분이 적은 환경에서 화산분출하여 생긴 분석구(scoria cone)의 스킨아층, 물을 만나 급격히 식으면서 형성되는 쇄설성 각력암, 용암흐름중에 굳어진 용암표면 내부의 용암이 빠져나오면서 생

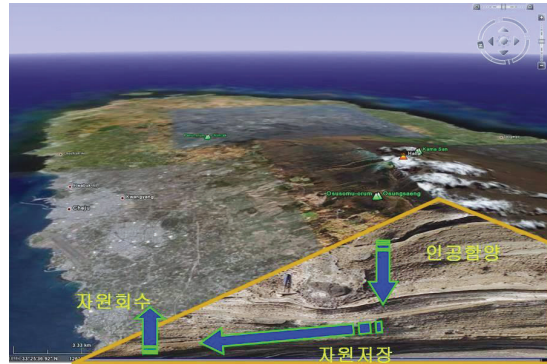


그림 1. Conceptual model of Jeju-friendly aquifer recharge technology. The background image is derived from Google Earth as of June 2008.

기는 용암터널 같은 고투수성 지질구조는 지하수의 흐름과 저장을 용이하게 하는데 중요한 역할을 한다. 이러한 투수성 구조뿐만 아니라 수분이 많은 화산분출로 형성되는 응회환또는 응회구(tuff ring or tuff cone)의 응회암(tuff)층, 미립의 퇴적물층, 절리가 잘 발달하지 않은 화산암체와 같은 저투수성 매질과 구조가 투수층과 교호하면서 지하에 반복적으로 산출된다는 사실을 많은 시추코어로부터 알 수 있다.

뿐만 아니라 중산간지역으로 올라갈수록 지하수면상부인 불포화대 구간이 두꺼워져서 시범연구가 진행되고 있는 해발 350m 근처에서는 그 두께가 180m에 이른다. 이렇게 두꺼운 불포화대는 불포화대 중간에 주입한 물이 오랜시간 흐르게 하는 통로역할과 함께 그러한 유동과정에서 주입된 물의 천연여과재로서의 기능도 수행하게 된다.

이렇게 주입된 물은 불포화대를 거쳐 최종적으로 지하수면에 도달하여 대수층과 만나면 인공함양정 하류에 분포하는 지하수관정에서 뽑아 쓰게 된다 (그림 1).

J-ART는 한라산국립공원과 그 주변 지역에 내린 빗물이 하천을 따라 흘러 발생하는 홍수유출수를 인공함양 원수로 사용한다. 그런데, 최근까지 제주도 하천 유출수의 수량과 수질에 대한 연구가 미비하여 과연 연중 얼마나 많은 시간동안 얼마나 많은 양의 물을 주입가능할 것인가에 대한 물음과 주입원수인

하천유출수의 수질은 어떠한가에 대한 물음에 답할 정량적인 기존의 자료가 전무하였다. 따라서 제주친화형 대수층인공함양 기술이 시범 적용지역인 한천제2 저류지를 포함하는 한천유역을 중심으로 하천유출수의 수량/수질에 대한 연구가 진행되었다. 본 연구는 한천의 수량을 중심으로 전개하겠다.

### 3. 한천 유역의 지형지질 특성

한천은 한라산(EL. 1,950m) 정상부에서 발원하여 탐라교육원 동쪽 부근~오라컨트리 골프장~용담동 해안으로 유하하는 하천(유역면적 35.01km<sup>2</sup>, 최대유하거리 19.95km, 유역 평균폭 1.75km, 형상계수 0.09, 평균고도 704.19m, 5차수)으로 집중호우시에만 홍수유출이 발생하고, 평상시에는 건천인 상태를 유지하고 있다(문덕철 외, 2009).

한천유역 탐라교육원을 기점으로 상류지역은 개발이 거의 이루어지지 않는 산림(62.8%)이며, 중간지역은 초지(20.0%)로 이루어져 있으며, 하류지역 일부 도시 및 취락지(1.7%)로 구성되어 있다(제주발전연구원, 2008).

한천 유역의 지질 특성을 살펴보면 조면암류는 중합운동장 부근에서 해안에 이르는 동쪽 지역과 발원

지인 천왕사 부근에도 분포하고 있으며, 그 외의 지역은 현무암질 용암류로 이루어져 있다. 퇴적암은 탐라교육원 부근과 오라컨트리 동남쪽에 소규모 발달하고 있으며, 민오름에서 종합경기장을 거쳐 해안에 이르는 유로는 용암류 경계에 달하고 있다.

## 4. 한천의 홍수유출 특성 분석

### 4.1 유출 빈도

연구지역은 탐라교육원 동쪽부근에 위치한 탐라교의 상류(EL. 500m)지역으로, 유역면적은 10.11km<sup>2</sup>이며, 유역평균 강수량은 3,140mm이다. 탐라교에는 제주특별자치도 환경자원연구원에서 집중호우시 발생하는 유출규모를 파악하기 위해 1999년도에 하천유출량관측소를 설치하여 수위를 관측해오고 있으며, 특히 2007년 7월부터는 수위와 유속을 동시에 측정할 수 있는 기기를 설치하여 운영 중에 있다(그림 2).

하천유출량관측소에서 수집한 2004. 1. 1.부터 2008. 10. 31. 까지의 장기 수위관측 자료(그림 3)를 이용하여 유출빈도를 분석한 결과를 표 1에 나타내었다. 한천 상류지점에서 발생빈도는 총 66회이며, 연도별 유출회수를 보면 2004년도 19회로 가장 많이



그림 2. The Location(Left; blue solid rectangle) and the state of installation(Right) of stream discharge monitoring equipment at the upstream of Hancheon watershed.

표 1. Frequency of discharge event at Tamnagyo water level monitoring station(EL. 500m) in upstream of Hancheon.

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
2004		1	2	2	3	2	2	2	4		1		19
2005			2	2	2		1	2	1				10
2006				1	3	2	5	1	2				14
2007			1				3	5	5	2			16
2008			1	1	1	4							7
Average	1.0	1.5	1.5	2.3	2.7	2.8	2.5	3.0	2.0	1.0			13.2

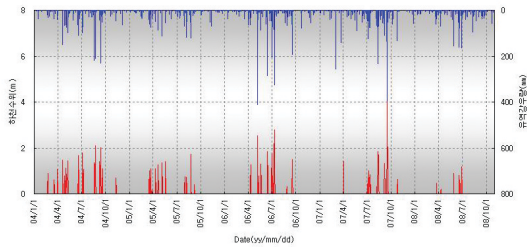


그림 3. Precipitation and stream water level during flash flood at Tamnagyo water level monitoring station in Hancheon.

발생하였으며, 2007년 16회, 2008년도는 가장 낮은 7회의 유출빈도를 보이고 있다. 연간 평균 유출발생 횟수는 13.2회, 월별 유출 횟수가 가장 많았던 시기는 7월(2.8회)로 조사되었다.

2004년부터 2008년 10월까지 관측 기간 동안 한천 상류지역의 탐라교 집수구역에서 총강우량은 1,982~4,590mm, 하천유출을 발생시킨 강우량은 최소 17mm에서 최대 468mm를 보이고, 유출지속시간은 6~53시간(평균 22시간), 최고수위 변화는 강우량, 강우강도, 선행강우 등의 영향으로 인해 최소 0.2m에서 최대 4.03m(평균 1.15m)로 수위가 등락을 하고 있다. 특히, 최고수위까지 도달하는 시점은 유출이 발생한 후 평균 약 3시간이 걸리고 있는 것으로 분석되었다.

#### 4.2. 유출량 및 유출률

한천 상류지점에서의 유출량 산정은 탐라교에 설치된 수위측정기와 유속측정기를 이용하여 측정된 자료(2007년 1월 ~ 2007년 12월)를 사용하여 유량을

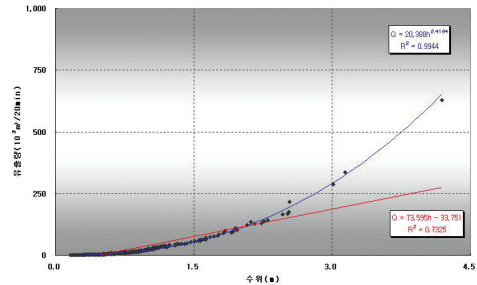


그림 4. Relationship between stream discharge rate and stream water level during flash flood at Tamnagyo water level monitoring station in Hancheon.

환산하였다. 2007년도 한천 상류지역의 강우에 의한 유출은 총 16회에 걸쳐 발생하였으며, 관측된 수위와 유속자료를 단면적법에 적용하여 유출량을 산정한 결과, 총 유출량은 6,055,000m<sup>3</sup>이었고, 유출시 최대유출량은 1,556,000m<sup>3</sup>(8월11일)이었다. 그림 4는 관측된 수위와 산정된 유량과의 관계를 나타낸 그림이다. Table 2에서 보는 바와 같이 수위와 유량간의 R2는 0.7325~0.9944로 분석되어 매우 높은 상관성을 보였다.

한천 상류지점인 탐라교 유역의 유역강우량은 유역 인근에 위치한 5개 강우량 관측소(그림 1)에서 2004년 1월 1일 ~ 2008년 10월 31일 사이에 관측된 강우량 자료를 이용하였다. 연간 유출량을 연도별로 살펴보면(표 3), 전반적으로 유출량과 유출률이 유역강우량과 비례하는데, 2008년은 유역강우량은 2,400mm으로 2005년보다 약 400mm가 많음에도 불구하고 유출회수가 7회에 그쳐 유출량 및 유출률이 617,443 m<sup>3</sup> 과 2.6%로 조사되었다. 2008년의 강우패턴이 이

표 2. Relationship between stream water level and velocity and between water level and discharge rate

Observed Period	Used data range	Equation	Parameter estimation	R <sup>2</sup>
2007.1	0.16≤h≤4.19	V=ah <sup>b</sup>	V=1,888h <sup>0.6813</sup>	0.8967
-		V=ah±b	V=1,611h+0.3228	0.9515
2007.12		Q=ah <sup>b</sup>	Q=20388h <sup>2.4194</sup>	0.9944
		Q=ah±b	Q=73,595h-33,751	0.7325

h: stream water level, V= water velocity, Q= stream discharge rate, a and b= coefficient.

표 3. Estimate of the yearly runoff rate at Tamnagyo in Hancheon stream

Year	Annual precipitation (mm)	Total water resource (m <sup>3</sup> )	Runoff(m <sup>3</sup> )	Runoff rate (%)
2004	3,048	30,804,654	10,391,572	33.73
2005	1,982	20,027,106	3,238,685	16.17
2006	3,681	37,202,795	14,062,800	37.80
2007	4,590	46,387,478	12,271,298	26.45
2008	2,400	24,254,833	617,443	2.55

전에 비해 하천유출을 발생할 정도의 집중호우 발생 빈도가 낮은 반면 비가 고루 자주 내렸기 때문에 판단된다.

하천유출 자동 모니터링 장치는 고정된 위치에 고정된 지점의 유속 및 수위를 측정할 수 밖에 없고 이를 바탕으로 하상 단면에 대해 확장하여 유출량을 추정하므로 이에 많은 오차를 내포할 수 있다. 이에 대한 부분은 앞으로 측정 단면의 확대 및 하상의 정리 등을 통하여 보다 향상된 추정과정이 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결론 및 토의


제주시 소재 한천에 설치된 홍수피해 저감용 저류지와 연계하여 제주도의 지구과학적 특성에 기반한 지하수 인공함양 기술이 적용되었다. 이 인공함양 기술은 여름철 집중되는 홍수유출동안에 발생하여 빠르

게 바다로 이동되어 없어지는 하천 유출수 일부를 취수하여 지하에 주입하므로써 사용가능한 지하수자원으로 변환시켜 주는 기술이다. 제주도 하천은 평소 건천이고 홍수유출의 발생시간을 예측하기가 어렵고 일단 발생하면 유출 지속시간도 짧지만 하천에 가까이 접근하기가 위험하여 하천 유출수의 수량 및 수질에 대한 자료가 부족하였다.

본 연구는 한천 제2 저류지를 포함하는 한천 상류 지역의 유역특성 및 홍수유출수의 특징을 양적인 측면에서 분석하였다. 유출빈도는 평균 13.2회였으며 연중 5월에서 8월 사이에 집중하고 있다. 자동모니터링 자료를 통해 하천수위와 유출량과의 상관관계를 구하였으며, 일반적으로 강우량과 유출량 및 유출률은 비례하지만, 2008년 처럼 강우가 연중 고루 발생하여 집중호우가 적은 패턴을 보일 때는 예전의 강우량에 비해 유출빈도, 유출량과 유출률이 작게 조사되었다.

본 연구에서 얻은 결과는 제주친화형 대수층 인공함양 기술을 설계하고 평가하는데 중요한 자료로 이용될 것이다.

## 사사

본 연구는 21세기 프린티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 3-2-3)에 의해 수행되었습니다. 

### 참고문헌

1. 김용철, 김용제, 2009, 기후변화 대응 지하수 인공함양 기술, 한국수자원학회지, Vol.42 No.5, pp.58-65.
2. 문덕철, 고기원, 박원배, 하규철, 2009, 제주도 한천 상류유역의 유출특성, 한국지하수토양환경학회 춘계 학술발표회.
3. 제주발전연구원, 2008, 하천 유출수 활용방안 마련을 위한 수문 및 수질특성 기초연구, 57p.
4. 한국지질자원연구원, 2008, 지하수-지표수 연계 순환/유동 시스템 해석 기술 실용화, 121p.