한천저류지 운영에 따른 홍수조절효과 평가

An Evaluation of the Flood Control Effect according to the Hancheon Reservoir Operation

문 덕 철* / 정 관 수** / 박 원 배*** / 김 용 철****

Moon, Duk Chul / Jung, Kwan Sue / Park, Won Bae / Kim, Yong Cheol

Abstract

Hancheon reservoir, which is located upstream of Jeju city, has been built for flood mitigation after Typhoon Nari, 2007. To verify flood mitigating effect of the this reservoir on the downstream area, runoff analysis based on the measured data (two stream discharge monitoring stations and inflow data to the reservoir) is carried out during torrential rain followed by typhoon Dainmu, 2010. The stream water level was recorded as 3.14 m for the peak at the down gradient station. The stream water level under the assumption of absence of Hancheon reservoir is calculated as 4.16 m using the estimated rating curve, stream water propagation velocity, and the bypassed volume of water to the reservoir. This result shows that clear effect of reservoir operation which is capable of mitigating peak discharge in the downstream area.

Keywords : Hancheon reservoir, Stream water level, Propagation velocity, reservoir inflow

요 지

본 연구에서는 2007년 제주지역을 강타한 태풍 ‘나리’ 이후 홍수조절을 위해 한천유역에 설치된 저류지의 효과를 정량적으로 평가하였다. 이를 위해 2010년 태풍 ‘덴무’의 내습 시, 한천 상·하류에 위치한 하천유량 관측소의 자료와 저류지 유입량 자료를 이용하여 한천저류지 운영이 하류지역에 미치는 홍수저감 효과를 검토하였다. 분석결과, 하류지역에서의 실제 하천수위는 3.44m를 기록하였으나, 수위-유량 관계식, 유출전파속도, 저류지 유입량 등을 활용하여 저류지가 운영되지 않았을 경우의 하류지역 하천수위를 분석한 결과 4.16m로 예측되었다. 이와 같은 결과는 한천유역에 설치된 저류지의 홍수저감 효과를 분명하게 보여주는 것으로 향후 유사한 사상에 대해서도 적절한 기여를 할 수 있을 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 한천저류지, 하천수위, 유출전파속도, 저류지 유입량

1. 서 론

제주지역은 연평균 강수량이 1,975mm에 달하는 국내

최대 다우지역임에도 불구하고, 전 세계적인 기후변화 영향으로 인해 강수량의 양극화 현상이 관측되고 있다. 실제로 1996년과 2005년도 제주시 연강수량은 900mm로 극

* 교신저자, 제주특별자치도개발공사 물산업연구센터 연구원 (e-mail: waterfeel@jpdco.kr, Tel: 064-780-3426)

Corresponding Author, Research Associate, Water Research Center, Jeju Special Self-Governing Province Development Corp., Jeju 695-961, Korea

** 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: kksjung@cnu.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

*** 제주발전연구원 연구실장 (e-mail: gwaterpark@jdi.re.kr)

Jeju Development Institute, Jeju 690-029, Korea

**** 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 연구원 (e-mail: yckim@kigam.re.kr)

Geologic Environment Division, KIGAM, Daejeon, 305-350, Korea

심한 가뭄이 발생하였으나, 1999년과 2007년도에는 장마·태풍 시 집중호우로 인해 연강수량이 2,000 mm가 넘어 침수 등의 피해가 발생한 바 있다(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2011). 또한 도시지역의 확장은 그 동안 빗물이 침투되었던 산림, 초지, 농경지가 아스팔트·콘크리트 등으로 피복되어 지하로 침투되는 빗물 양이 감소하는 반면, 지표유출량은 크게 증가하여 제주에서도 예전과 달리 침수·재해의 가능성이 증가하고 있다.

2007년 9월16일 제14호 태풍 ‘나리’가 제주지역에 내습 시, 1일 강수량이 제주(126° 31′ 54″ E/33° 30′ 39″ N, EL. 20 m) 420 mm, 진달래밭(126° 33′ 20″ E/33° 22′ 11″ N, EL. 1,489 m) 598 mm, 성판악(126° 37′ 10″ E/33° 23′ 04″ N, EL. 763 m) 556 mm에 달하였고, 이로 인해 대부분의 하천이 범람하여 도 전역에 걸쳐 인명피해가 15명, 이재민이 594명이었으며, 침수피해도 14,141 ha가 발생하였고, 이에 대한 복구비용은 1,623억 원이 소요되었다(Jeju Special Self-governing Province Jeju, 2008). 따라서 제주시에서는 태풍 ‘나리’와 같은 집중호우 시 제주시 도심지역의 홍수위험을 저감하기 위해 유역종합치수계획의 일환으로 제주시를 관통하는 4개 하천을 대상으로 홍수저감저류지(총 11개소, 총 저류용량 $1.61 \times 10^6 \text{ m}^3$)를 설치하였다(Kim and Kim, 2010).

한편, 제주지역의 경우, 내륙과는 매우 상이한 유출특성을 보이므로 대부분의 하천이 평상시에는 건천특성을 보이고 일정량의 호우 발생 시에만 하천수량이 통과하는 전형적인 간헐천 특성을 나타낸다(Chung et al., 2011). 또한 한천저류지의 경우 하천유출량의 증가에 의한 수해의 위험성

을 방지함과 동시에 하천의 치수 안전도 향상을 주목적으로 설치된 시설로서 설치된 후 3년간 그 효과를 확인할 만한 규모의 호우가 발생하지 않았으나, 2010년 태풍 ‘덴무’시 발생한 호우로 인해 저류지로의 대규모 측방유입이 최초로 발생했다. 즉, 한천저류지는 구조물 자체가 산지하천의 우회흐름을 제어하는 형식이어서 생활용수, 농업용수, 농업용수 등 각종 용수공급이나 홍수조절을 위한 댐 등과 같은 일반적인 저수지 운영기법을 적용하기도 어려운 시설이다.

이에 본 연구에서는 한천저류지의 홍수조절효과를 정량적으로 평가하기 위해 2010년 태풍 ‘덴무’ 시의 홍수사상을 대상으로 관측치 중심의 유출분석을 수행하였다. 즉, 추정된 수위-유량 관계곡선, 저류지로의 유입량 등의 자료를 기반으로 한천저류지 운영에 따른 하류부에서의 침투홍수량의 변화를 살펴봄으로써 저류지 운영이 하류지역 홍수위험 저감에 미치는 효과를 평가하고자 한다.

2. 대상지역 및 보유자료

한천은 한라산(EL. 1,950 m) 북쪽 정상부에서 발원하여 탐라교육원 동쪽~오라컨트리 골프장~용담동 해안으로 유하하는 하천으로 상류에서 하류에 이르기까지 대부분 건천특성을 보이다가 일반적으로 장마 또는 태풍 내습에 따른 발생하는 집중호우 시 돌발적으로 유출이 발생하여 하는 하천이다(Fig. 1). 한천의 유역면적은 35.01 km²인 5차수 하천이다. 유역의 형상은 좌안 측으로 토천이 유입되는 것을 제외하고는 지류가 거의 없는 하천형태를 보인다. 한천에는 해발 275~370 m 지역에 총 2개의 저류지가 설치되어 있는데, 저류용량은 제1저류지 4.72×10^5

Fig. 1. The Description of the Hancheon Stream according to Runoff (left: before, right: after)

m³, 제2저류지 4.53 × 10⁵ m³이다(Fig. 2).

제주특별자치도 수자원본부에서는 한천의 하천유량을 파악하기 위해 표고 35 m(한천1)와 500 m(한천3), 한천 제2저류지 유입구 인근 하천(한천2)에 하천유량 관측소를 설치·운영 중에 있다. 이들 관측소 중 한천1·한천3 지점에서는 수위와 유속, 한천2 지점에서는 수위를 측정할 수 있는 기기가 설치되어 10분 간격으로 모니터링하고 있다. 또한 저류지(1·2) 내로 유입되는 양을 모니터링하기 위해

유입수위 및 저류수위 관측장비를 운영하고 있다(Fig. 2).

3. 태풍 “덴무” 기간 동안 수문특성

3.1 강우특성

2010년 8월 9일부터 11일까지 태풍 “덴무”에 의한 집중호우 시 강수량 분포 및 면적강수량을 파악하기 위해 등우선도를 작성하였다(Fig. 3). 등우선도는 총 73개소(기상

Fig. 2. The location of the Hancheon Reservoirs and Stream Gauges in the Hancheon Stream Watershed (left) and Location of Inflow Gauge to the Reservoir-1 and Reservoir-2 (right)

Fig. 3. The Precipitation Distribution Map Calculated using the Data from 73 Rain Gauge Stations during the Typhoon “Dianmu”, August 2010

Table 1. Average Rainfall for Watersheds Calculated using the Precipitation Distribution Map of Fig. 3 during the Typhoon “Dianmu”, August 2010

Watershed		Area (km ²)	Avg. rainfall (mm)
Northern		469	214
	Jocheon	127	160
	Dongjeju	76	267
	Jungjeju	90	278
	Seojeju	90	279
	Aewol	86	113
Western		377	106
	Hallim	142	117
	Hangyeong	103	80
	Daejeong	131	114
Southern		496	226
	Andeok	63	171
	Seoseogwi	84	198
	Jungseogwi	107	271
	Dongseogwi	108	298
	Namwon	134	176
Eastern		497	153
	Pyoseon	208	181
	Seongsan	116	126
	Gujwa	173	137
Total		1,839	179

청 25개소, 제주특별자치도 재난안전대책본부 48개소)의 강수량 자료를 크리깅공간기법을 적용하여 작성하였고, 면적평균강수량은 등우량선법(Isohyetal Method)을 이용하여 계산하였다(Min et al., 1999).

이 기간 동안 도 전역에 걸쳐 평균 179 mm의 비가 내렸는데, 유역별로 보면 북부 유역과 서부 유역이 각각 214 mm, 106 mm이고, 남부 유역과 동부 유역은 226 mm, 153 mm로 분석되어 북부와 남부유역을 중심으로 강수량이 집중되었다(Table 1). 또한, 동제주·중제주·서제주·중서귀·동서귀 유역에서 260 mm를 초과하는 강수량을 기록하였고, 서부유역인 한림·한경·대정 유역에서의 강수량은 120 mm 미만이었다.

Table 2는 태풍 “덴무” 기간 동안 한천유역¹⁾(Fig. 3)에서의 평균 강수량을 산정한 결과를 나타낸 것이다. 평균 강수량은 400 mm이었고, 350 mm 이상의 강수량 분포를

나타낸 지역이 전체 유역면적의 57%를 차지하고 있는 것으로 분석되었다. 또한 등우선 간 수문총량을 합한 결과 한천유역에서의 전체적인 수문총량은 약 $1.41 \times 10^7 \text{ m}^3$ 인 것으로 분석되었다.

3.2 유출특성

3.2.1 수위수문곡선

한천을 포함한 대부분의 제주도 하천은 평상시에는 건천으로 있다가 집중호우 시에만 일시적으로 유출이 발생하는 간헐천으로 유출발생 시 유출여부를 육안 또는 하천에 설치된 수위측정기로 확인할 수 있다.

Fig. 4는 하천유량 관측소인 한천1, 한천2, 한천3 지점에서 관측된 수위자료와 기상관측소의 강수량 자료를 도시한 것이다. 하천유량 관측소의 수위자료는 하천바닥을 기준으로 측정된 값으로 평상시에는 건천인 상태이므로 측정값은 “0”이다. 각 관측소 별 작성된 수위수문곡선을

¹⁾한천유역은 Fig. 2에서 한천 하류에 위치해 있는 하천유량 관측소인 “한천1 지점” 상류의 유역임.

이용하여 유출발생시간, 유출지속시간, 최고수위 도달시간, 최고수위를 파악하였다(Table 3). Table 3에서와 같이 한천 유역의 상류지역에 위치한 한천3 지점의 유출은 8월 10일 12:00분에 발생하였고, 유출지속시간은 26.7시간이었다. 유출이 발생 후 8.3시간 후인 8월 10일 20시 10분에 최고수위인 2.04m를 기록하였다. 한천2 지점은 8월 10일 12시40분에 유출이 발생하였고, 최고수위(1.15 m)는 약 7.8시간 후인 8월10일 20시30분에 기록되었으며, 유출지속시간은 23.8 시간으로 분석되었다. 하류지역에 위치한 한천1의 유출발생 시각은 8월 10일 14시 10분이고, 유출지속시간은 43.7시간이었다. 한천1 지점에서는 유출이 발생한 후 6.7시간 후인 8월 10일 20시 40분에 최고수위인 3.44m에 도달하였다(Fig. 4). 이처럼 한천에서의 유출은 상류지역에서 먼저 발생하고 점차 하류 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 따라서 각 하천유량 관측소의 유출발생 시각 또는 최고수위 도달시각 정보를 이용하여 유출 전파속도를 알 수 있는데, 일반적으로 한천에서의 유출 전파속도는 약 2.4 km/hr (0.6 m/s) 정도이다(Park and Moon,

2010).

한천1에서 한천2 지점까지 거리는 약 8.2 km이고, 한천2에서 한천3 지점까지 거리는 약 2.1 km임을 감안하여 태풍 “덴무”시 발생한 유출사상에 대하여 유출 전파속도를 산술적으로 계산한 결과, 한천1과 한천2 지점 간의 유출 발생 시간차는 1.50시간으로 최전방 수위 전파속도는 약 5.5 km/hr (1.52 m/s)이고, 한천2와 한천3 지점 간의 시간차는 0.67시간으로 최전방 수위 전파속도는 약 3.1 km/hr (0.86 m/s)으로 계산되었다. 여기서, 최전방 수위라 함은 건천상태인 하천에서 최초로 유출이 발생했을 때의 수위를 의미한다. 한천2와 한천3 지점의 최고수위 도달에 있어 시간차는 0.33시간으로 최고수위 전파속도는 약 6.3 km/hr (1.75 m/s)이었다. 이처럼 유출발생 시 최전방 수위 전파속도가 최고수위 전파속도 보다 늦은 것은 유출발생 초기 상류에서 하류로 물이 흘러 내려가면서 하천 하상의 지하와 지상에 분포하고 있는 하상 공극과 크고 작은 요철지에 물을 채우면서 시간이 지체되기 때문인 것으로 판단된다.

Table 2. Average Rainfall for the Hancheon Stream Watershed in Fig. 3 during the Typhoon “Dianmu”, August 2010

Isohyet interval rainfall (mm)	Inter-isohyet area (①, km ²)	Inter-isohyet avg. rainfall (②, mm)	① × ②	Inter-isohyet total amount of rainfall (m ³)	Avg. rainfall (mm)
< 50	0.0	25	0	0	400
50~100	0.6	75	49	48,545	
100~150	2.5	125	317	317,418	
150~200	4.1	175	726	726,342	
200~250	2.5	225	558	558,187	
250~300	2.6	275	709	709,261	
300~350	2.7	325	875	874,690	
350~400	2.7	375	1,023	1,023,163	
400~450	2.6	425	1,101	1,101,448	
450~500	2.6	475	1,247	1,246,885	
500~550	2.5	525	1,318	1,318,238	
550~600	2.9	575	1,665	1,665,146	
600~650	2.5	625	1,596	1,596,000	
650~700	3.3	675	2,248	2,247,893	
> 700	0.9	725	635	634,807	
Total	35.0	-	-	14,068,023	

Table 3. Characteristics of Stream Discharge for the Stream Gauges in Hancheon Stream

Station	Discharge occurring time	Discharge duration (hr)	Time of peak water level	Peak arrival time (hr)	Peak water level (m)
Hancheon1	2010-8-10 14:10	43.7	2010-8-10 20:40	6.5	3.44
Hancheon2	2010-8-10 12:40	23.8	2010-8-10 20:30	7.8	1.15
Hancheon3	2010-8-10 12:00	26.7	2010-8-10 20:10	8.2	2.04

3.2.2 수위-유량 관계식 유도

하천유량 관측소 중 수위와 유속을 동시에 측정하고 있는 관측소(한천1·한천3)에 대해 수위에 따른 유량을 산정하고, 수위와 유량 간의 관계식을 작성하였다(Fig. 5).

한천1 지점의 수위(H)가 0.58~3.44 m 범위에서 유량(Q)은 $3.50 \times 10^3 \sim 1.98 \times 10^5 \text{ m}^3/10 \text{ min}$ ($5.8 \sim 329 \text{ m}^3/\text{s}$)이었고, 수위와 유량 상관관계의 R^2 는 “ $Q=aHb$ ”식에서 0.9885로 분석되어 상관성이 높은 관계식을 산출하였다(Table 4). 한천3 지점의 수위(H)가 0.13~2.04 m에서 유량(Q)은 0.72

Fig. 4. Stream Water Level Change for Each Stream Gauge in Hancheon Stream and Rainfall during the Typhoon “Dianmu”, August 2010

Fig. 5. Rating Curves Fitted to the Date of and Water Level Obtained from Two Stream Gauge in Hancheon Stream

Table 4. Summary of Rating Curves in Fig. 5

Station	Discharge period	Stream water level (m)	Relations	Constant			R^2
				a	b	c	
Hancheon1	2010-8-10 14:10 ~2010-8-12 9:40	0.58 m $\leq H \leq$ 3.44 m	$Q(\text{m}^3/10 \text{ min})=aHb$	11,222	2.0437	–	0.9885
			$Q(\text{m}^3/10 \text{ min})=aH+b$	42,912	–34,411	–	0.8308
			$Q(\text{m}^3/10 \text{ min})=aH^2+bH+c$	20,510	–25,979	15,836	0.9535
Hancheon3	2010-8-10 12:00 ~2010-8-11 14:30	0.13 m $\leq H \leq$ 2.04 m	$Q(\text{m}^3/10 \text{ min})=aHb$	15,795	2.1142	–	0.9386
			$Q(\text{m}^3/10 \text{ min})=aH+b$	30,881	–12,270	–	0.9477
			$Q(\text{m}^3/10 \text{ min})=aH^2+bH+c$	7,526	16,106	–6,080	0.9594

$\times 10^3 \sim 6.12 \times 10^4 \text{ m}^3/10 \text{ min}$ ($1.2 \sim 10^2 \text{ m}^3/\text{s}$)이고, 수위와 유량관계의 R^2 는 “ $Q=aH^2 \pm bH \pm C$ ” 식에서 0.9594로 분석되었다(Table 4).

3.2.3 유량 및 유출률 산정

하천유량은 수위에 따른 통수면적과 유속자료를 이용하여 산정하였고, 유속자료가 결측된 시간의 유량은 Table 4에서 유도된 수위-유량 관계식 중 상관도가 가장 큰 관계식을 이용하여 보정하였다.

Table 5는 한천1과 한천3 지점에 대한 유량을 산정한 것이다. Fig. 6과 Table 5에서 보는 바와 같이 한천1 지점의 유량은 전체 수문총량($1.41 \times 10^7 \text{ m}^3$)의 30.6%인 $4.30 \times 10^6 \text{ m}^3$ 로 분석되었다. 또한 한천3 지점의 총 유량은 $2.63 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이었고, 유출률은 수문총량($6.25 \times 10^6 \text{ m}^3$) 대비 42.0%로 분석되었다. 한천1의 유출률과 한천3의 유출률이 다른 이유는 제주도 지표지질의 투수성이 매우 좋아 하류로 이동하면서 더 많은 하천수와 빗물이 지하로 침투되었을 뿐만 아니라, Fig. 3에서 보는 바와 같이 한라산의 지형적인 영향으로 상류의 강우강도가 크고, 지형 경사가 매우 급해 유출이 발생할 수 있는 조건이 하류보다 상류

에서가 더 우세하기 때문으로 판단된다.

3.3 저류지 유입특성

각 저류지의 유입구에 설치된 수위관측장비에서 관측된 자료를 이용하여 유입수위 변동특성을 파악하였다. 유입구에서 측정된 수위자료는 유입구 상단을 기준으로 측정된 값으로 평상시에는 건천인 상태이므로 측정값은 “0”이다. Fig. 7은 한천저류지(제1저류지, 제2저류지)의 유입 시간별 수위변동을 도시한 것이다. 상류지역에 위치한 제2저류지의 유입은 8월 10일 12시 40분에 시작되었고, 유입지속시간은 27.5 시간이었다. 8월 10일 20시 30분에 최고수위인 1.20 m를 기록하였다. 한천2 지점의 유출발생 시간과 제2저류지 유입시간이 일치함에 따라, 유출발생 이전부터 수문을 개방하였거나 유출과 동시에 수문을 개방한 것으로 판단할 수 있다. 제2저류지 유입구에서 하류 쪽으로 0.94 km 떨어진 제1저류지 유입구에서의 유입은 8월 10일 13시 00분에 시작하였고, 최고수위(0.94 m)는 8월 10일 20시 30분에 기록하였으며, 유입지속시간은 42.7 시간이었다. 한천1과 한천2 구간의 유출발생 전파속도가 약 5.5 km/hr임을 감안하면, 제1저류지의 수문도 제2저류지

Fig. 6. Discharge Hydrograph Estimated from the Two Stream Gauges in Hancheon Stream during the Typhoon “Dianmu”, August 2010

Table 5. Stream Discharge and Discharge Percentage

Station	Discharge period	Subwatershed area (km ²)	Avg. rainfall (mm)	Total amount of rainfall (10 ³ m ³)	Total discharge (10 ³ m ³)	Stream discharge percentage (%)
Hancheon1	2010-8-10 14:10 ~2010-8-12 9:40	35.01	400	14,068	4,304	30.6%
Hancheon3	2010-8-10 12:00 ~2010-8-11 14:30	10.11	607	6,250	2,625	42.0%

와 마찬가지로 유출발생 이전부터 수문을 개방한 것으로 판단되며, 이는 저류지 감시용 CCTV를 통해 확인할 수 있었다.

저류지 유입량은 각 저류지의 수위 자료를 웨어공식인 “Kindsvater-Cater식(Kim et al., 2004)”에 적용하여 산정하였는데, 적용한 Eq. (1)과 같다.

$$Q = C_e \frac{2}{3} \sqrt{(2g)} b_e h_e^{3/2} \quad (1)$$

여기서, C_e 는 유량계수, b_e 는 웨어 입구의 유효폭(제1저류지의 경우 10 m, 제2저류지의 경우 10~20 m), h_e 는 유효수두로서 제1저류지의 경우 $C_e=0.602 + 0.075 h/p$, 제2

저류지의 경우 $C_e=0.592 + 0.012 h/p$ 를 적용하였는데, 이 때 p 는 웨어의 높이로서 제1저류지와 제2저류지 웨어의 높이는 각각 4.5 m, 6.5 m이다.

Fig. 8은 각 저류지별 유입시간에 따른 유입량을 도시한 것이다. 상류지역에 위치한 제2저류지에서는 27.5 시간 동안 $6.90 \times 10^5 \text{ m}^3$ 의 하천유출수가 유입되었고, 제2저류지보다 하류 쪽에 위치해 있는 제1저류지에서는 42.7시간 동안 $3.19 \times 10^5 \text{ m}^3$ 의 하천유출수가 저류지 내로 유입되었다.

Park and Moon (2010)의 연구결과에서 동일 유출사상에 대하여 한천3에서 하류 쪽으로 하천유출수가 흘러 제2저류지 유입구에 도달한 유량은 $2.74 \times 10^6 \text{ m}^3$ 인 것으로 산정한 바 있다. 이를 감안하면, 제2저류지에는 유출수

Fig. 7. Change of Stream Water Level, Overflowing Water Level into Reservoirs, and Rainfall during the Typhoon “Dianmu”, August 2010

Table 6. Characteristics of Streamwater Inflow into Reservoirs

Reservoir	Inflow time	Inflow period (hr)	Peak level above the inflow gate (m)	Peak time
Reservoir-1	2010-8-10 13:00	42.7	0.94	2010-8-10 20:30
Reservoir-2	2010-8-10 12:40	27.5	1.20	2010-8-10 20:30

Fig. 8. Change of Inflow into each Reservoir during the Typhoon “Dianmu”, August 2010

의 25.2%가 유입되었고, 제1저류지에는 11.7%가 유입되었던 것으로 파악된다.

3.4 저류지 운영이 하류지역 하천수위에 미치는 영향

앞에서 한천1과 한천2 지점의 유출전파속도를 구했고, 유출시간에 따른 각 관측소별 유량 및 유입시간에 따른 각 저류지의 유입량을 산정하였다. 이러한 유출전파속도 및 시간에 따른 하천유량 및 저류지 유입량 자료를 이용하여 저류지 운영이 하류지역 하천수위에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig. 9는 한천1 지점의 유출시간에 따른 유량과 저류지 유입량을 도시한 것이다. 특히, 저류지 유입량은 저류지가 운영되지 않았을 경우 저류지로 유입된 하천유출수가 전부 한천1까지 도달된 것으로 가정하여 저류지 유입시각을 한천1에서의 유출발생 시각과 일치시켜 표시하였다.

회색으로 표시한 영역은 유출전파속도를 고려한 저류지 유입량이고, 흰색으로 표시한 영역은 한천1에서의 유

량이다. 그림에서 보는 바와 같이, 8월 10일 20시 40분에 유량은 $1.97 \times 10^5 \text{ m}^3/10 \text{ min}$ ($328 \text{ m}^3/\text{s}$)으로 최대이었고, 이 시각 저류지 유입량은 $1.40 \times 10^4 \text{ m}^3/10 \text{ min}$ ($23.3 \text{ m}^3/\text{s}$) (제1저류지 : $4.19 \times 10^3 \text{ m}^3/10 \text{ min}$, 제2저류지 : $9.80 \times 10^3 \text{ m}^3/10 \text{ min}$)이다. 즉, 저류지가 운영되지 않았을 경우를 고려한 한천1에서의 유량은 $2.12 \times 10^5 \text{ m}^3/10 \text{ min}$ ($353 \text{ m}^3/\text{s}$)으로 증가한다.

Fig. 9에서 저류지가 운영되지 않았을 경우 한천1 지점의 유량과 제1·2저류지의 유입량을 합한 후 시간에 따른 총 유량 자료를 Table 4의 “ $Q=aHb$ ($0.58 \text{ m} \leq H \leq 3.44 \text{ m}$)” 식에 적용하여 저류지 미설치 시 한천1 지점에서의 수위를 추정하였다(Fig. 10). 8월 10일 20시40분에 한천1의 실측 수위는 3.44m이었지만, 저류지가 운영되지 않았을 경우의 수위는 4.16m로 예측할 수 있다. 즉, 저류지 운영으로 하천유출수가 저류지로 유입됨으로써 하류지역 한천1 지점에서 최고수위에서의 수위가 약 0.72m 하강하는 효과를 얻은 것으로 분석되었다.

Fig. 9. Change of Inflow into Reservoirs and Discharge from the Hancheon1 during the Typhoon “Dianmu”, August 2010

Fig. 10. Comparison of Stream Water Level at Hancheon1 Stream Gauge between the Cases of with-reservoirs and without-reservoirs

4. 결 론

본 연구에서는 2010년 제4호 태풍 “덴무” 시 한천의 유출분석을 통해 한천저류지 운영이 한천 하류지역 홍수위험 저감에 미치는 영향을 분석하였다. 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 한천유역에서의 평균강수량은 400 mm이며, 수문총량은 $1.41 \times 10^7 \text{ m}^3$ 으로 분석되었다.
- 2) 한천 관측소별 수위변동 결과, 한천3 지점의 유출은 8월 10일 12시 00분, 한천2 지점은 8월 10일 12시 40분, 한천1 지점은 8월 10일 14시 10분에 발생하였다. 최고수위는 유출이 발생한 후 한천3 지점은 8.2 시간 후(2.04 m), 한천2 지점은 7.8시간 후(1.15 m), 한천1 지점은 6.5시간 후(3.44 m)에 도달하였다. 특히, 유출 발생 시간정보를 이용하여 유출전파속도를 파악한 결과, 최전방 수위 전파속도는 3.1 km/hr인 반면, 최고수위 전파속도는 이보다 빠른 6.3 km/hr이었다.
- 3) 유량과 유출률을 산정하기 위해 수위-유량 관계식을 작성하였고, 작성된 관계식을 이용하여 유량과 유출률을 산정한 결과, 한천1 지점의 총 유량은 $4.30 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 전체 수문총량의 36%이었다. 한천3 지점의 유량은 $2.63 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 유출률은 42%로 나타났다.
- 4) 한천 제1저류지와 제2저류지의 유입수위 및 저류지 내부수위 계측자료를 통해 저류지 유입량 및 내부수위 변동특성을 파악한 결과, 한천 제2저류지는 27.5 시간 동안 $6.90 \times 10^5 \text{ m}^3$ 의 하천유출수가 유입되었고, 제1저류지 42.7시간 동안 $3.19 \times 10^5 \text{ m}^3$ 이었다. 또한, 저류지로 유입된 하천유출수는 약 35시간에 걸쳐 저류지 바닥을 통해 지하로 침투되었다.
- 5) 유출전파속도, 하천유량 및 저류지 유입량 자료를 이용하여 한천저류지 운영이 하류지역 하천수위에 미치는 영향을 분석하였다. 하류지역에서의 최고수위는 3.44 m를 기록하였으나, 저류지가 운영되지 않았을 경우 수위는 4.16 m 예측되고 있어, 저류지 운영으로 하천유출수가 저류지로 유입됨으로써 하류지역의 하천수위를 0.72 m 하강하는 효과를 얻은 것으로 분석되었다.

지금까지 한천유역에 설치된 상·하류의 하천유량 관측소와 저류지 유입량 저류지의 유입구에 설치된 수위관측장비에서 실측된 자료를 이용하여 분석한 결과, 한천저류지를 운영함으로써 하류지역에서는 하천수위가 하강함으로써 제해 저감 효과가 있는 것으로 판단된다. 그러나

본 연구는 유출초기부터 종료까지 하천수위의 침두치(peak)가 1회만 발생한 경우이고, 한천 저류지(1·2)의 유입구에 설치된 수문이 유출초기부터 개방된 상태인 경우로 한정된다.

유출초기에 발생하는 1차 하천수위 침두치 발생 이후 또 다른 큰 강우강도에 의해 더 큰 규모의 2차 하천수위 침두치가 발생할 경우에는 수문의 운영 상태에 따라 하류지역의 홍수조절 효과가 좌우될 수 있다. 즉, 1차 하천수위 침두치 발생 시부터 저류지의 수문을 개방할 경우 저류지 저류능력의 감소되어 2차 하천수위 침두치가 발생할 경우 하류지역의 제해 저감할 수 있는 충분한 저류용량을 확보할 수 없기 때문이다.

따라서 저류지의 홍수조절효과를 극대화하기 위해서는 유출시간 및 하천수위에 따른 저류지의 수문개방이 매우 중요할 것으로 판단되며, 이를 위해서는 기상레이더에 의한 강우강도를 예측하고, 유역 내 하천수위·유출지속시간·저류지 유입량 및 저류지 내 수위에 대한 관측시스템을 설치·운영하여 종합적인 저류지 운영(수문작동) 매뉴얼 마련이 필요할 것으로 판단된다.

References

- Chung, I.M., Lee, J.W., Kim, J.T., Na, H.N., and Kim, N.W. (2011). Development of Threshold Runoff Simulation Method for Runoff Analysis of Jeju Island, *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 20, No. 10, pp. 1347-1355.
- Jeju Special Self-governing Province Jejusi. (2008). A Report on Construction for Hancheon reservoir, pp. 2-38~2-44.
- Kim, W., Yoon, K.S., Lee, E.R., Kim, C.Y., Kim, D.G., Cha, J.H., and Park, E.H. (2004). Streamflow Measurement Manual, Sustainable Water Resources Research Center Technical Report 2004-01, pp. 54-62.
- 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*. Vol. 46, No. 5, pp. 521-533.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. (2011). Application of Analysis Technique and Modeling for Coupled Groundwater-Surface Water Flow System, Sustainable Water Resources Research Center, p. 496.
- Min, B.H., Ok, C.Y., Son, I.S., Kim, G.H., Min, I.G., and

Seo, J.H. (1999). Riparian-engineering, The Publisher Hyeong-Seol, pp. 78-79.

Park, W.B., and Moon, D.C. (2010). A Basic Study on Characteristics of Hydrologic and Water Quality for Utilization of Streamwater, Jeju Development Institute, pp. 21-70.

The Web Pages of Jeju Special Self-governing Province

Disater Prevention and Countermeasures Headquarters,
<http://bangjae.jeju119.go.kr>

The Web Pages of Korea Meteorological Administration,
<http://www.kma.go.kr>

논문번호: 13-098	접수: 2013.12.09
수정일자: 2013.12.30/12.31	심사완료: 2013.12.31