

ORIGINAL ARTICLE

선행강우를 고려한 제주하천 유출특성 분석

양성기 · 김동수^{1)*} · 정우열

제주대학교 토목공학과, ¹⁾단국대학교 토목환경공학과

Rainfall-Runoff Characteristics in a Jeju Stream considering Antecedent Precipitation

Sung-kee Yang, Dong-su Kim^{1)*}, Woo-yul Jung

Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

¹⁾Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea

Abstract

The rainfall-runoff characteristics in Jeju Island significantly differ from those in inland, due to highly permeable geologic features driven by volcanic island. Streams are usually sustained in the dry conditions and thereby the rainfall-runoff characteristics changes in terms of initiating stream discharge and its types, depending highly on the antecedent precipitation. Among various the rainfall-runoff characteristics, lag time mainly used for flood warning system in river and direct runoff ratio for determining water budget to estimate groundwater recharge quantity are practically crucial. They are expected to vary accordingly with the given antecedent precipitation. This study assessed the lag time in the measured hydrograph and direct runoff ratio, which are especially in the upstream watershed having the outlet as 2nd Dongsan bridge of Han stream, Jeju, based upon several typhoon events such as Khanun, Bolaven, Tembin, Sanba as well as a specific heavy rainfall event in August 23, 2012. As results, considering that the lag time changed a bit over the rainfall events, the averaged lag time without antecedent precipitation was around 1.5 hour, but it became increased with antecedent precipitation. Though the direct run-off ratio showed similar percentages (i.e., 23%) without antecedent precipitation, it was substantially increased up to around 45% when antecedent precipitation existed. In addition, the direct run-off ration without antecedent precipitation was also very high (43.8%), especially when there was extremely heavy rainfall event in the more than five hundreds return period such as typhoon Sanba.

Key words : Lag time, Direct runoff-ratio, Antecedent precipitation, Rainfall-runoff characteristics, Jeju stream

1. 서론

지체시간은 유역의 강우 발생 이후 유역의 출구로의 유출량 반응 시간을 나타내는 척도로서 홍수 관리에 있어 중요한 인자로 홍수반응 시간으로 생각할 수 있으며, 짧은 홍수반응시간은 높은 유출속도를 갖게

되므로 홍수위험도가 높아질 가능성이 있다 (Kim과 Choi, 2011). 지체시간은 유효우량 주상도의 질량 중심선으로부터 침투유량이 발생하는 시간까지의 간격을 계산하여 산정한다(Lee, 2005). 제주도의 경우, 지체시간의 계산은 한라산 산간의 강우가 유출의 형태로 제주시와 같은 하류에 영향을 미치는 시간을 알 수

Received 18 November, 2013; Revised 11 February, 2014;

Accepted 7 April, 2014

*Corresponding author: Dong-Su Kim, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea

Phone: +82-31-8005-3611

E-mail: dongsu-kim@dankook.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있어 홍수 예경보 등 방재대책에 유용하게 활용될 수 있다. 지체시간은 강우강도에 따른 편차가 발생하고 (Kang 등, 2013), 또한 선행강우 존재 시 직접유출의 양상의 변화로 유출의 시간차가 존재할 수 있어 지체시간에 영향을 준다 (Lee 등, 2012). 선행강우(Antecedent Precipitation)는 현재의 강우사상 이전 시기에 발생한 강우가 현재의 강우-유출에 영향을 줄 경우의 강우를 말한다 (Lee, 2005). 제주도는 높은 투수성의 지질학적 특성으로 인해 대부분의 하천은 건천의 상태를 유지하고 있다. Chung 등 (2011)은 제주도의 경우, 선행강우가 없거나 적은 경우 유출이 발생하지 않으며 강수량이 매우 적더라도 선행강우가 있는 경우 유출이 발생한다고 보았다. 그리고 실측 자료를 기반으로 운영해 본 결과 선행 강우 부재 시 약 65 mm의 누적강우 이전에는 직접 유출이 발생하지 않고 지하로 침투된다고 보고하고 있다. 따라서, 선행 강우 존재 시 이러한 침투의 정도가 낮고 보다 작은 강우에도 유출이 발생하므로 선행 강우의 존재 여부는 지체시간을 계산하는 데 매우 중요한 인자가 될 수 있을 것이다.

한편, 선행강우의 존재 여부는 단일 강우사상에 대한 강수량 대비 유출율의 비율에도 영향을 미친다. 제주도에 있어서 강수량 대비 유출율은 부존 지하수 함양량을 간접적으로 산정하는 데 매우 중요한 인자로 보통 연간 강수량 대비 유출율을 계산하고 있다. 이러한 연간 강수량 대비 유출률은 다양한 문헌에 나타나지만 그 비율은 연구자에 따라 약간 상이하다. 제주도와 한국수자원공사(2003)에 따르면 제주지역의 유출율은 강수량 대비 21%로 나타난다고 보고하고 있다. Koh (2006)는 유출율은 26%로 제시하고 있다. 그러나, 단기 강우사상의 유출율에 대한 조사는 이루어지지 않거나 주목을 받지 못하고 있다. 일반적으로 특정 강우 사상에 대한 유출율은 선행 강우 여부에 따라 편차가 존재하므로 연간 평균 유출율로 특정 강우 사상에서 주어진 강수량에 대한 유출량을 산출하는 것은 많은 오차를 수반할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 제주도의 강우-유출 특성 중 선행강우 존재 여부에 따라 상이한 지체시간과 유출율을 강우사상 별로 분석해 보고자 한다. 분석 대상으로 제주도 북부의 한천유역을 선정하였고, 2012년 4번의 태풍을 비롯한 주요 강우 사상에 대하여 선행 강우 존재 시와 비존재 시로 나누어 지체시간

과 해당 강우 사상에 대한 단기 유출율을 계산하였다.

2. 대상 유역 및 강우 사상

분석 대상 유역에 위치한 한천은 제주도 중산간에서 발원하여 제주도 북부 해안으로 흐르는 전형적인 산지하천으로 하폭이 약 35 m이고 하천 바닥은 현무암질 암반으로 구성되고 자갈이 다소 분포되어 있다. 하상경사는 약 0.0256 으로 상대적으로 급한 자갈 및 암반 지형의 전형적인 산지하천의 형태를 보여주고 있다 (Yang 등, 2012). 한천은 제주시를 관통하는 하천으로 2007년 태풍 나리 통과 시 하천이 범람하여 막대한 피해를 입은 바 있어 (Jie 등, 2007), 제주도 및 제주시의 주요 재난재해 관심 대상 하천이기도 하다. 한천은 유하거리가 약 11 km로 매우 짧아 다우지역인 한라산 인근의 강우의 영향이 매우 빠른 속도로 유출의 형태로 나타난다. 본 연구에서는 제주시 진입 직전에 위치한 제2 동산교를 출구로 하는 유역을 분석 대상 유역으로 선정하여 (Fig. 1a) 한라산 인근의 강우의 유출 발생에 따른 지체시간을 산정하였다. 본 연구에

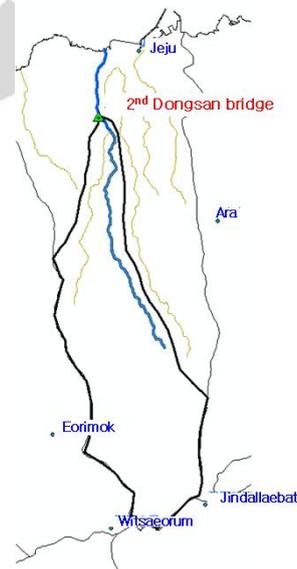


Fig. 1. The location of 2nd Dongsan bridge and upstream watershed (thick black line) with the Dongsan bridge as the outlet of the watershed and locations of rainfall gages for assessing area-averaged rainfall.

Table 1. Rainfall events for assessing lag time and direct runoff rate in 2012

Rainfall event	Type	Period (2012)	Accumulated rainfall (mm)
Kahnun	Typhoon	7.18~7.19	Jindaljaebat:385, Witseoreum:342
8.23 rainfall	Heavy storm	8.23~8.24	Jindaljaebat: 390, Witseoreum: 413
Bolaven	Typhoon	8.27~8.28	Jindaljaebat: 526, Witseoreum: 573
Tembin	Typhoon	8.30~8.31	Jindaljaebat: 131, Witseoreum: 67
Sanba	Typhoon	9.17~9.18	Jindaljaebat: 845, Witseoreum: 815

서 한천 유역의 강우량은 제주기상청의 제주, 아라, 진달래밭, 윗세오름, 어리목 강우관측소 (Fig. 1b 참조)에서 제공하는 강우자료를 활용하였고, 제2동산교를 유역의 출구로 지정하고 해당 유역의 면적강우를 산정하였다. 면적강우 산정방법으로 티센 평균방식을 활용하였다.

한천의 지체시간 및 사상 별 유출율을 산정하기 위해 다음 Table 1과 같은 2012년도 제주도에 서 발생한 주요 강우 사상을 선택하였다. 2012년도 제주도를 통과한 태풍은 카눈, 볼라벤, 덴빈, 산바가 있고, 8월 23일 발생한 집중호우도 분석에 포함시켰다. 8월23일 강우, 볼라벤, 덴빈은 연속적으로 발생하여 선형강우가 존재 시 지체시간 및 유출율의 변화를 파악하는 데 적절한 관측지로 판단된다. 태풍 산바의 경우, 한라산 산간의 강우량이 800 mm 이상 많은 강우량을 보이고 있다. 이는 600년 빈도의 강우강도에 해당되고, 덴빈과 강우사상 발생 시기에 15일 이상의 이격이 있어 선형강우가 존재하지 않고 높은 빈도 강우강도가 발생

했을 경우 지체시간 및 유출율을 파악하는 데 적합한 강우사상이라고 볼 수 있다.

유량을 관측한 지점은 제2동산교로 Fig. 1b와 같이 한천 중하류에 위치하고 있으며 매시간 단위로 유량을 관측하였다. 유량은 이동형 전자파표면유속계를 활용하여 하천에서 직접 계측한 자료를 주로 활용하였으나 일부 태풍 볼라벤, 산바와 같이 극한 사상에서 현장 조건의 악화로 직접 계측하지 못한 자료는 1점 측정 방식인 고정식 전자파표면유속계 자료를 참고하여 보간하여 사용하였다. 이동식 전자파표면유속계는 뮤트로닉스사의 MU2720을 사용하였고 (뮤트로닉스, 2010), 고정식 전자파표면유속계는 칼레스토 (Ott, 2000)를 사용하였으며 하천의 중앙에 위치하여 유속을 측정하였다. 수위 측정을 위해서는 연속 수심측정기를 매설하여 운영하였다. Fig. 2a는 자갈 및 암반하상으로 이루어진 제2동산교 직상류를 보여주고 있으며, Fig. 2b는 운용중인 이동식 및 고정식 전자파표면유속계를 보여주고 있다.

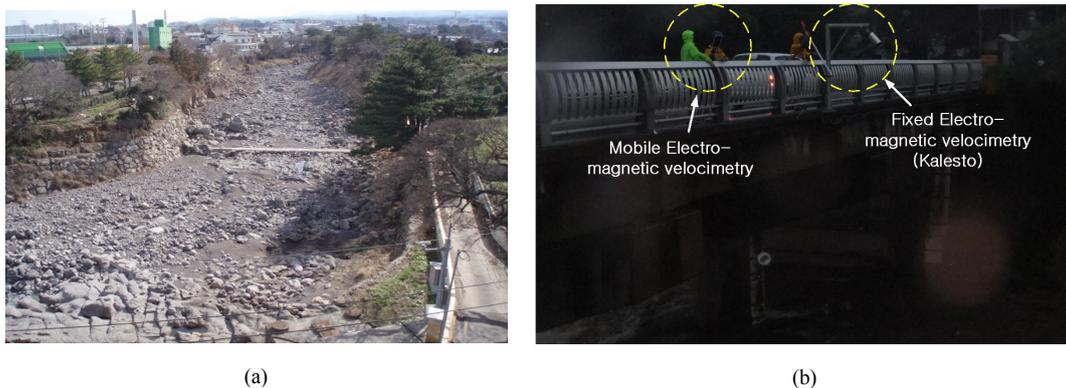
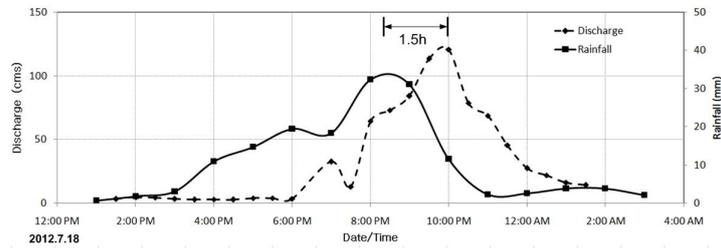
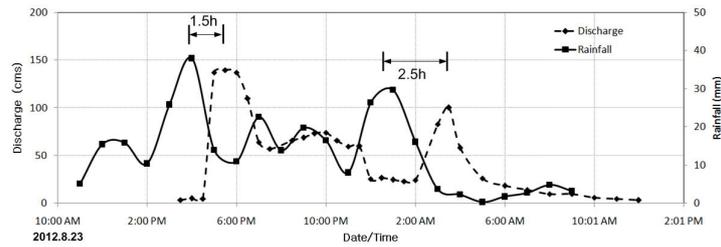


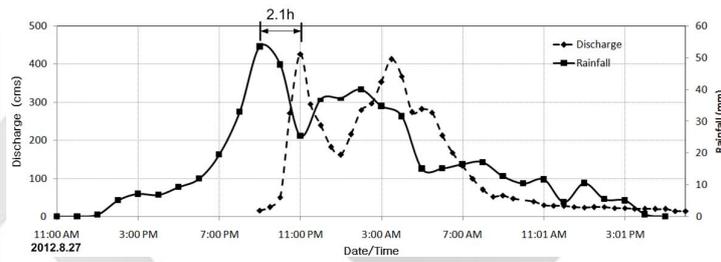
Fig. 2. Site conditions and instrumentations for measuring streamflow discharge: a) stream bed conditions with gravel and rock bed in the upstream of the 2nd Dongsan bridge; b) installed mobile and fixed electromagnetic flowmeters.



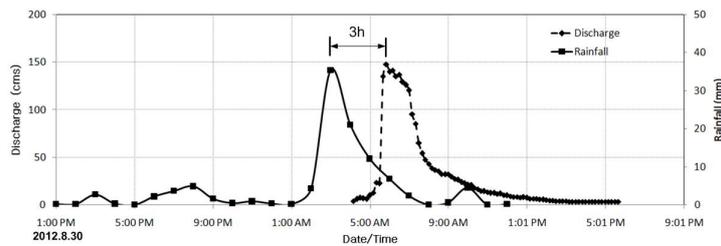
[TyphoonKahnun]



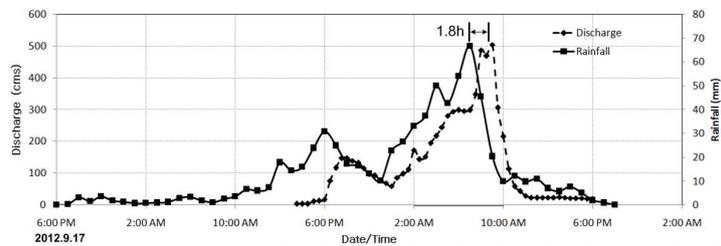
[8.23 Rainfall]



[Typhoon Bolaven]



[Typhoon Tembin]



[Typhoon Sanba]

Fig. 3. Estimation of the lag time based on rainfall and discharge time series for individual rainfall events during 2012.

3. 지체시간 산정 및 분석

지체시간 (Lag Time)의 계산은 원칙적으로 유출수 문곡선의 첨두 발생시간에서 유효강우의 질량중심에 해당하는 시간의 차이를 통해 계산되나 실무에서는 일반적으로 질량중심이 계산하기 까다롭고 번거로운 문제가 있어 질량중심 대신 최대 강우강도가 발생하는 시간과의 차이를 통해 계산하는 간편법을 사용한다. 본 연구에서는 지체시간을 이러한 간편법을 통해 계산하였고 선행강우의 여부, 강우의 지속시간, 강우의 규모에 따른 지체시간의 차이를 규명하여 해당 유역의 유출특성을 파악하고자 하였다. 분석에 활용된 강우사상은 2012년에 발생한 5번의 대규모 강우-유출 사상인 태풍 카눈, 8.23일 집중호우, 볼라벤, 덴빈, 산바이다. Fig. 3은 2012년 한천 제2동산교 강우-유출 사상 별 시간당 강우량의 변화와 유출로 인한 수문곡선을 보여주고 있다. 지체시간은 그림과 같이 강우의 첨두와 유출의 첨두와 이격 시간을 산정하여 계산하였다. 특이점으로 8.23 집중호우의 경우, 강우 지속시간이 18시간으로 길고 최대 강우가 두 번에 걸쳐 나타났으며 지체시간의 경우도 내부적으로 약 1시간의 차이를 보였다.

Fig. 4는 각 강우사상 별 지체시간 (Lag Time)을 나타내고 있다. 분석 결과, 태풍 카눈과 8.23일 강우와 같이 선행강우가 없는 경우 약 1.5시간의 지체시간을 보였으나 볼라벤과 덴빈의 경우처럼 뚜렷한 선행강우

가 있는 경우 지체시간이 점차 증가되는 결과를 보였다. 태풍 산바와 같이 선행강우의 여부가 다소 규정하기 어려운 경우도 선행강우와의 이격시간이 15일 이상 차이가 있어 지체시간이 줄어들고 선행강우가 없는 경우와 매우 유사한 결과를 보여주고 있다.

선행강우의 여부에 따른 지체시간의 변화는 단일 강우-유출 사상인 8.23일 집중호우 시에도 확인할 수 있다. 선행강우의 존재로 인한 지체시간의 점차적 증가는 강우로 인한 유출의 반응 시간이 선행강우로 인해 증가한다는 결과인데 선행강우가 존재할 경우 유역 지반이 포화되어 강우의 유출로의 시간이 단축될 것이라는 기존사례(Kang 등, 2013)과 상반되는 특이한 결과이다. 이러한 결과는 제주도의 특수한 지질구조와 연관되었을 것으로 예상되나 본 연구의 자료로는 확인할 수 없다. 다만, 이러한 선행강우 존재 시 지체시간의 증가는 강우의 공간분포의 차이에 기인할 수 있으므로 추후 부가적인 분석이 필요하다고 할 수 있다. 그리고 그 경향이 8.23 집중호우, 볼라벤 (8.27), 덴빈(8.30)이 걸쳐 나타났지만 이는 제주도 한천 유역의 특수한 반응 특성이라고 추정할 수도 있다.

이러한 한천 유역에 대한 지체시간에 대한 연구 결과는 제주시 홍수 예경보에 활용될 것으로 기대한다. 정리하면 한천 유역의 경우 지체시간은 최소 1.5 시간으로 산정할 수 있다. 제주도 타 유역의 지체시간을 동일한 방식으로 규명할 필요가 있지만 대략 1.5 시간을 지체시간으로 산정하고 하천 방재계획 등을 수립할

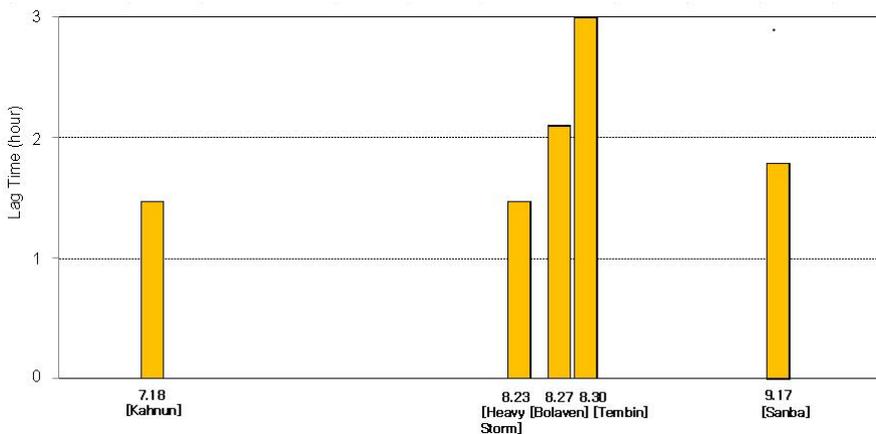


Fig. 4. Lag time variation with respect to rainfall events.

시 사용할 수 있을 것이다.

4. 홍수 사상 별 강우총량과 유출총량 변화

물수지 분석에 있어 강우총량과 유출총량의 분석은 수자원 계획을 수립할 시 활용되는 중요한 요소이다. 일반적으로, 강우총량 대비 유출총량의 비율은 분석 기간을 1년 단위로 수행하여 수자원 활용 측면에서 사용된다. 제주도의 경우, 지하수가 수자원 공급원으로 주로 사용되고 구체적인 용수활용량 등을 산정하는데 있어 지하수 함양량을 기준으로 하는데, 지하수 함양량은 강우총량, 하천을 통한 유출총량, 증발산량 등을 파악하여 결정한다. 하천을 통한 유출총량은 유량 조사가 미진한 관계로 자료가 없거나 NRCS 방법 등 간접적인 방법을 통해 추정되어 정확도가 저하되는 경향을 보여왔다. 조사 기관이나 기간 별 오차가 있어 제주도의 유출총량에 대한 수치는 아직 유동적이어서 물수지 분석의 오류를 수반하는 문제가 있어왔다. 화산섬인 제주도의 경우 투수계수가 매우 커 선행강우 여부에 따라 사상 별 강우-유출량의 비가 상이한 현상을 보일 것으로 예상된다. 본 연구에서는 1년 단위의 강우-유출 총량을 파악하는 대신, 강우사상 별 강우-유출 총량비를 산출하여 강우 발생 시 유출량의 비를 강우 규모와 선행강우 여부에 따른 특성을 기반으로 규명하고자 하였다.

분석 관측지점은 제주시 한천의 제2동산교이고 유량과 강우량 자료는 지체시간 분석에 사용된 Fig. 3의 결과를 활용하였다. Fig. 5는 2012년 주요 강우 사상 별 유출량의 비율을 보여준다.

태풍 카눈 (2012.7.18)의 경우, 침투유량은 약 125 m³/s이고 선행강우가 없는 조건에서 강우 시 발생하는 유출률을 확인할 수 있는 사상이었다. 강우 지속시간은 약 7시간, 유출률은 약 22.3%로 나타났다. 태풍 카눈 이후 약 35일 경과 후 집중호우(8.23)가 발생하였는데 침투유량은 약 150 m³/s이다. 강우 지속시간은 약 18시간, 유출률은 약 25%로 나타났다. 카눈과 8.23 집중호우 사상의 경우, 선행강우가 나타나지 않아 강우량 대비 유출량 비율이 20% 초반대로 나타났다. 그러나, 8월 27일에 발생한 태풍 볼라벤의 경우 유출률이 약 47%로 나타나 선행강우의 영향을 상당한 수준으로 받았음을 알 수 있다. 그리고, 3일 후 연속적으로 발생한 태풍 덴빈의 경우 유출률이 33.3%로 상대적으로 감소하였다. 이 결과는 선행강우가 없었던 사상에 비해 유출률이 높지만 선행강우가 있더라도 강우총량의 규모에 따라 유출률의 차이가 발생하는 경향을 보여준다. 덴빈의 총강우량은 볼라벤의 약 60%에 해당된다. 태풍 덴빈 이후 약 17일 후 발생한 태풍 산바는 침투유량이 약 500 m³/s, 강우 지속시간이 약 12시간으로 나타난 매우 큰 규모의 홍수사상이었다. 태풍 산바의 경우, 선행강우가 존재하지 않다는 가정하의 태

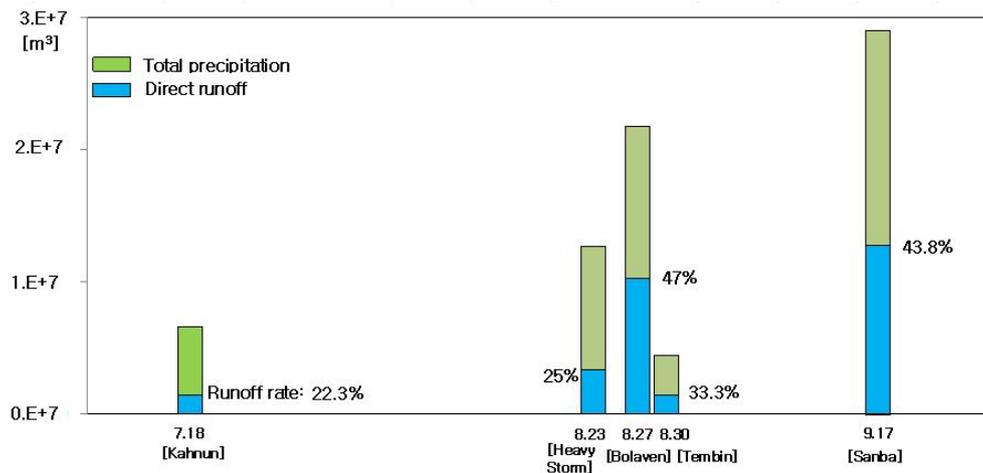


Fig. 5. Ratio between direct runoff and total precipitation for the major rainfall events in 2012.

풍 카는 (7.18)과 8.23일 집중호우 사상과 비교해 볼 때, 유출율이 선행강우가 있고 총강우량이 큰 볼라벤과 유사하게 43.8%로 매우 높게 나타나는 결과를 보였다. 이 결과는 8월 중 세차례 연속으로 발생한 홍수 사상의 영향이 약 15일 정도 경과 후에도 영향을 주었을 가능성이 있고, 전체 홍수 사상의 규모가 상대적으로 매우 커서 일정량의 강우로 지반이 포화된 후 나머지는 유출되어, 홍수 사상 기간 내에서 유출율의 비율이 증가하여 나타난 결과로 추정할 수 있다.

2012년의 5번의 대규모 유출 시 강우량 대비 유출량의 비율을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 선행 강우가 없는 강우 사상의 유출률은 20% 초반대로 나타나나 태풍 산바와 같이 강우사상의 규모가 매우 큰 경우 유출률은 증가할 수 있다. 둘째, 선행강우가 있을 경우 유출률은 40% 이상으로 증가할 수 있으나 덴빈과 같이 강우규모가 작은 경우는 강한 선행강우의 존재에도 불구하고 30% 대의 유출률을 보인다. 셋째, 선행강우의 규모가 크고 선행강우와의 이격이 15일 내외인 경우 선행강우의 영향을 받아 유출률이 증가한다.

그러나, 이러한 결과는 한라산 중산간에 위치한 경사가 다소 급하고 투수성이 매우 높은 유역에서 도출되어, 제주도 내 경사가 완만하거나 상이한 지질 및 지형학적 특성을 지닌 유역의 경우 다소 다른 결과를 보여줄 수 있다.

다만, 이러한 결과에 대한 분석의 시사점은 다음과 같다. 첫째, 연평균 유출량에 비해 사상별 유출량은 선행강우 여부, 강우의 규모에 따라 상당한 차이를 보이므로 홍수대비 관점에서 보면 단순한 연평균 유출률을 적용할 경우 단일 사상에 대한 유출률을 과소 혹은 과다 산정할 수 있음을 알 수 있다. 둘째, 용수 이용의 계절별 경향을 파악하고자 할 경우, 본 연구의 분석결과를 참고할 때 유출률이 선행강우 여부나 강우의 규모에 따라 변동폭이 매우 커진다는 사실을 의미한다. 셋째, 추후 2012년도 강우-유출 사상과 같은 사례를 지속적으로 파악할 경우 강우 사상 별 유출률을 강우 사상 만으로도 정량화할 수 있어 실무 활용 가능성을 증대할 수 있다.

5. 결론 및 향후과제

본 연구는 2012년 제주도를 통과한 4회의 태풍과 1회 집중호우 시 관측된 강우 및 유량 자료를 기반으로 제주시 한천의 제2동산교 유역의 지체시간과 강우량 대비 유출율을 각 강우 사상별로 산정해 보았다. 그 결과, 선행강우 유무에 따라 지체시간과 유출율의 편차가 크게 발생하였음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 계절별 혹은 특정 강우 기간 등의 국부적인 지하수함양량을 계산할 때, 연평균 유출율을 사용할 경우 함양량을 과다 산정할 수 있을 수 있다는 점을 시사한다. 또한, 지체시간도 선행강우 존재 시 지체시간이 육지부와 상이하게 오히려 증가하는 양상을 보였다. 이러한 결과를 보다 일반화하기 위해 제주도 특유의 투수성이 높은 토양 특성의 국지성과 하천경사 및 하천의 수리학적 특성, 그리고 복잡한 지하지질구조와 결부된 분석이 수행될 경우 흥미로운 결과가 도출될 것으로 예상된다. 향후, 본 연구와 유사한 자료분석을 한천 이외의 다른 유역에 실시하여 지체시간 및 유출율을 산정할 경우, 제주도의 지역 별 유출 특성을 파악하는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업 “제주 수자원 연구단(10지역기술혁신B02)”의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- Chung, I., Lee, J., Kim, J., Na, H., Kim, N., 2011, Development of Threshold Runoff Simulation Method for Runoff Analysis of Jeju Island, Journal of the environmental sciences, 20(10), 1347-1355.
- Jeju province and K-Water, 2003, Integrated Hydro-geologic and groundwater survey in Jeju island III.
- Ji, H., Koh, B., Yoon, K., Lee, S., Ahn, S., 2007, Investigation of disaster driven factors and permanent counteracts for Typhoon Nari, Magazine of Korea water resources association, 49(9), 29-35.
- Kang, Y., Kim, B., Park, S., Choi, H., 2013, Estimation of Effective Rainfall Guidance Considering Infiltration

- Capacity-Rainfall Intensity, Journal of KOSHAM, 13(1), 303-308.
- Kim, E., Choi, H., 2011, Estimation of flood index for ungauged small watershed using rainfall-runoff characteristics, 44(2), 34-42.
- Koh, K., 2006, Characteristics of groundwater and water resource management in Jeju Island (1), Magazine of Korea water resources association, 39(7), 73-80.
- Lee, B., Choi, J., Choi, Y., Bae, D., 2012, Validation of Real-Time River Flow Forecast Using AWS Rainfall Data, Journal of Korea Water Resource Association, 45(6), 607-616.
- Lee, J., 2005, Hydrology, Goomibook.
- Mutronix, 2010, Electro-magnetic surface velocimetry for low and medium flow, patent license 10-2010-89895.
- Ott, 2000, Radar sensor for contact free measurement of surface wave level, Kalesto.
- Yang, S., Kim, D., Yu, K., Kang, M., Jeong, W., Lee, J., Kim, Y., You, H., 2010, Comparison of Flood Discharge and Velocity Measurements in a Mountain Stream Using Electromagnetic Wave and Surface Image, Journal of the environmental sciences, 21(6), 739-747.

K C I