

강우조건과 토양함수상태를 고려한 자연하천과 댐 방류량 조건에서의 도달시간 산정

김동필* · 김경호**

Kim, Dong Phil*, Kim, Kyoung Ho**

Estimation of Travel Time in Natural River and Dam Outflow Conditions Considering Rainfall Conditions and Soil Moisture Accounting

ABSTRACT

Determination of the time parameters such as the travel time in the design flood is very important. The travel time is mainly used for flood and river management, and the travel time of non flood season is used for maintenance flow and management of the river. Estimation of travel time for natural rivers is mainly based on the geomorphological factors of the basin. In addition to the topographical factors, the travel time is calculated by considering the factors of the runoff curve, velocity and rainfall intensity. However, there is no study on the estimation of travel time considering both the rainfall condition and the soil moisture accounting by the frequency period. Therefore, the travel time calculation is divided into the case of setting the Hwanggang Dam and the Imjin bridge water level station of Imjin river as the natural river considering rainfall condition by the frequency period and the soil moisture accounting, and the case of traveling the Imjin bridge water level station according to the condition of outflow of the Hwanggang Dam. For the sections set as natural rivers, the results were verified by comparing with the newly developed travel time calculation method. Based on the results, the travel times of the Hwanggang Dam outflow conditions were calculated. The time to travel in this study can be secured flood control of the Imjin river basin and time to prepare for danger when outflowing the the Hwanggang Dam.

Key words : Travel time, Soil moisture accounting, Rainfall conditions by frequency, Dam outflow conditions

초록

설계홍수량 산정 시 도달시간과 같은 시간매개변수의 결정은 매우 중요한 요소이다. 도달시간은 주로 홍수 및 하천관리를 위해 이용되고 있으며, 평수기의 도달시간은 하천의 유지유량 및 이수관리를 위해 이용되고 있다. 자연하천에 대한 도달시간 산정은 주로 유역의 지형학적 인자를 기반으로 산정하고 있으며, 지형학적 인자 이외에 유출곡선지수, 유속, 강우강도의 인자를 고려하여 도달시간을 산정하고 있다. 그러나 재현기간별 강우조건과 토양함수상태를 함께 고려한 도달시간의 산정연구는 부재한 상황이다. 따라서 본 연구는 재현기간별 강우조건과 토양함수상태를 고려하여 임진강의 황강댐과 임진교 수위관측소 구간을 자연하천으로 설정한 경우와 황강댐의 방류량 조건에 따라 임진교 수위관측소에 도달하는 경우로 구분하여 도달시간을 산정하였다. 자연하천으로 설정한 구간에 대해서는 기 개발된 도달시간 산정방법과 비교·검토를 통해 결과를 입증하였으며, 이를 토대로 황강댐의 방류량 조건별 도달시간을 산정하였다. 본 연구에서 제시된 도달시간은 임진강 유역의 홍수관리와 황강댐 방류 시 위험에 대비할 수 있는 시간을 확보할 수 있다.

검색어 : 도달시간, 토양함수상태, 재현기간별 강우조건, 댐 방류량 조건

* 중신회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · dpkim@kict.re.kr)

** 중신회원 · 교신저자 · 충북대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Chungbuk National University · coastal@chungbuk.ac.kr)

Received June 29, 2018/ revised July 18, 2018/ accepted July 18, 2018

1. 서론

도달시간(travel time), 지체시간(lag time) 등과 같은 시간매개 변수의 결정은 설계홍수량 산정 및 수문모형을 구축할 때 중요한 과정 중의 하나이며, 1개 이상의 시간매개변수는 수문분석 시 반드시 필요로 한다. 이처럼 시간매개변수 중 하나인 도달시간은 주로 홍수기에 홍수 또는 하천관리를 위해서 주로 사용되고 있는 반면, 평수기의 도달시간은 하천의 유지유량 및 이수 관리를 위해서 중요한 자료로 활용될 수 있다. 자연하천에 대해 Kerby 공식, Kirpich 공식, Rziha 공식, Kraven (I) 공식은 주로 유역의 지형학적 인자를 기반으로 도달시간을 산정하고 있으며, Kraven (II) 공식과 연속형 Kraven 공식은 경사구간별 유속을 포함하여 도달시간을 산정하고 있다(KICT, 2004). 그리고 Jeong et al.(2002)은 일반화된 평균유속과 재현기간별 강우조건, Yoo et al.(2011)은 강우강도 식과 지역상수를 이용하여 도달시간을 산정하는 연구를 수행하였다. 도달시간 산정 연구는 초기에는 지형학적 인자만을 고려한 단일한 값만을 갖으나, 그 이후 단일한 도달시간 산정이 아닌 유속, 강우의 재현기간과 강우강도의 변화에 따라 도달시간을 산정할 수 있는 점이 크게 개선된 것이다.

도달시간을 결정하는 요인은 지형학적 인자, 유속, 강우강도 이외에 토양함수상태도 크게 관련된다. 토양함수상태에 따라 도달 시간은 다르게 나타나므로 토양함수상태를 고려한 도달시간 산정은 반드시 필요하다. 본 연구에서는 재현기간별 강우조건과 토양함수상태를 동시에 고려하여 도달시간을 산정하는 연구를 수행하였다. 상기의 조건을 만족하는 도달시간을 산정하기 위해 강우-유출 모형인 NWS-PC 모형을 이용하였으며, 이 모형은 토양함수상태계산(soil moisture accounting) 모형과 운동파(kinematic wave) 모형으로 구성되어 있다. 도달시간 산정을 위해 적용한 유역은 임진강의 황강댐과 임진교 수위관측소이며, 황강댐과 임진교 수위관측소 구간을 자연하천으로 설정한 경우와 황강댐의 방류량 조건에 따라 임진교 수위관측소에 도달하는 경우로 구분하여 도달시간을 산정하였다. 자연하천구간에 대해서는 기 개발된 도달시간 방법과 비교·검토를 통해 결과를 입증하였으며, 이를 토대로 황강댐의 방류량 조건별 도달시간을 산정하였다.

2. 연구방법

2.1 도달시간의 정의

유역의 응답 시간특성 변수 중 도달시간은 가장 빈번히 사용되는 시간매개변수로 다른 시간매개변수와 마찬가지로 강우-유출 자료와 유역의 물리적 특성으로 산정할 수 있다. 도달시간은 유역의 최원점에서 출구점 또는 설계지점까지의 거리를 유량이 이동하는

데 걸린 시간 또는 유효유량이 지속되어 전체 유역이 유출에 기여할 때까지의 시간으로 정의할 수 있다(KICT, 1994). 그러나 Pilgrim(1966)은 도달시간을 유량의 물리적 거동으로 설명한다는 것은 사실상 불가능하며, 이와 같은 어려움 때문에 실측 강우-유출 자료로부터 도달시간을 구하는 방법이 현재로서는 가장 정확한 방법이라고 하였다. 따라서 유역 최원점의 입력요소 발생과 이 요소로 인한 최대 유량의 발생사이의 시간으로 정의할 것을 제안한 바 있으며, 이와 같은 형태의 가정은 다음과 같다. 즉, 도달시간은 강우-유출관계를 이용하여 유효유량의 끝점과 직접유출 수문곡선의 감소곡선 부분의 변곡점과의 사이의 시간이며, 또 다른 대안은 유효유량의 중심점과 직접유출 수문곡선의 감소곡선부분의 변곡점 사이의 시간이라 정의할 수 있다.

또한 Bell et al.(1969)에 의하면 도달시간은 수문곡선의 상승구간 즉, 수문곡선의 상승기점에서 첨두발생시간까지의 시간과 같다고 정의한 바 있으며, 변곡점을 이용한 두 방법은 비교적 일관된 결과를 나타내더라도 이들 정의에 의해 측정된 도달시간은 호우사상에 따라 상당히 변한다는 것을 밝힌 바 있다. 이외에도 도달시간은 다른 시간매개변수와 같이 유역의 물리적 성질 혹은 유효유량의 주상도와 유출수문곡선과의 관계로 나타낼 수 있다. 도달시간에 대해 하천설계기준-해설(KWRA, 2009)에서는 유역의 물리적 특성을 가지고 첨두유량을 산정하기 위해 유역에서 수리학적 최원점에 내린 물 입자가 유역 출구점까지 도달하는데 걸리는 시간, Singh(1976)은 유역의 최원점에 내린 비가 유역출구에 도달하는데 소요되는 시간, Bedient et al.(1988)은 유역의 평형이 이루어지는 시간, McCuen et al.(1984)은 유역의 최원점으로부터 출구 또는 설계지점까지 물 입자가 이동하는데 필요한 시간, 미토양보전국(SCS, 1975)에서는 유역의 최원점에서 출구 또는 설계지점까지 물이 유하하는데 걸리는 시간으로 정의하고 있다.

이와 같은 도달시간의 정의 중 어느 것도 도달시간의 참값 또는 재현의 값을 제공하는 절대적인 정의라 할 수 없다. 그 이유는 첫째로 유역특성을 이용하여 도달시간을 산정할 경우 조도계수를 선정하고 동수반경을 결정하는 어려움이 수반되어 동일 유역이라 할지라도 설계길이에 따라 서로 다른 값이 산정될 수 있다. 둘째로는 강우-유출 자료를 이용하여 도달시간을 산정할 경우, 유효유량의 분리 및 유효유량 산정과 기저유출분리 방법에 따라 도달시간 값의 차이가 있기 때문이다(KICT, 1994). 뿐만 아니라 McCuen et al.(1984)은 도달시간을 결정하는 정확한 방법은 없으며, 이에 대한 참값은 결코 결정할 수 없다고 하였다. 이처럼 도달시간 산정식은 경험적 방법으로 입력 자료와 적용되는 흐름의 형태에 의해 분류되고, 이들 방법은 사면의 흐름, 수로흐름, 사면과 수로흐름, 그리고 관로의 형태와 개수로 흐름에 대해 기본적인 설계를 하는데 적용된다. 결국 도달시간은 일정한 강우강도가 계속되는 가정하에

유역의 물리적인 특성과 함께 야기되는 유역의 침투유량을 산정하는데 적용되는 유역반응 시간특성이라 할 수 있다.

도달시간은 유역의 최원점에 내린 비가 유역 출구에 도달하는데 소요되는 시간이다. 이러한 정의는 초기손실(initial loss)을 모두 만족하면서 동일한 강도의 호우가 전 유역에 걸쳐 최소한 홍수도달 시간 이상 발생하여야 한다는 전제가 만족한다면, Bedient et al.(1992)가 정의하고 있는 유역 내 평형도달시간(유입과 유출량이 동일해지는 시간)의 개념과 일치하게 된다. 홍수도달시간은 강우의 지속기간이 홍수도달시간과 동일할 때 해당 유역에서는 최대 침투 유량이 발생하게 된다는 의미이다. Fig. 1과 Fig. 2는 National Institute for Disaster Prevention(2013)에서 제시한 침투발생시간과 지체시간의 개념도이며, 홍수도달시간 개념도이다.

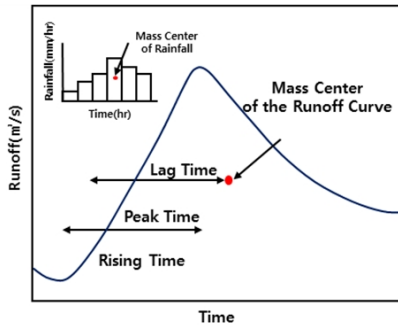


Fig. 1. Conceptual Diagram of Peak Occurrence Time and Lag Time (NIDP, 2013)

2.2 모형 이론

도달시간 산정을 위해 사용된 NWS-PC 모형은 크게 토양함수상태계산 부모형과 흐름에 대한 추적 부모형으로 구분된다. 토양함수상태계산 모형은 물 순환과정의 토지부분에서 입력된 강우를 하도 흐름의 유입량으로 변환시킨다. 흐름에 대한 추적 부모형의 기능은 하도 유입량을 유역 또는 소유역 출구의 유출로 추적하며, 운동과 추적법(kinematic wave routing method)이나 단위도-Muskingum 방법의 조합을 사용한다. 토양함수상태계산 부모형은 Tabios III et al.(1986)이 제시한 바와 같이 Fig. 3에서 유역을 상층부(upper zone)와 하층부(lower zone)로 구분한다. 상층부는 상부 토양층과 부유대수층(perched aquifer)과 같은 차단 저류(interception storage)를 나타내고, 하층부는 토양 함유수분과 지하수 저류를 나타낸다. 상·하층부의 수분은 자유로이 이동할 수 있는 자유수(free water)와

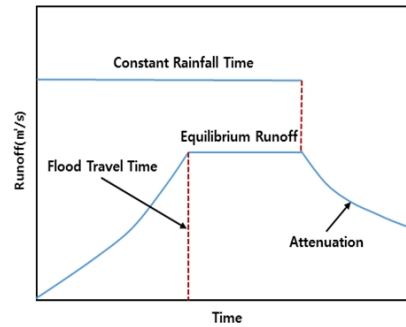


Fig. 2. Conceptual Diagram of Flood Travel Time (NIDP, 2013)

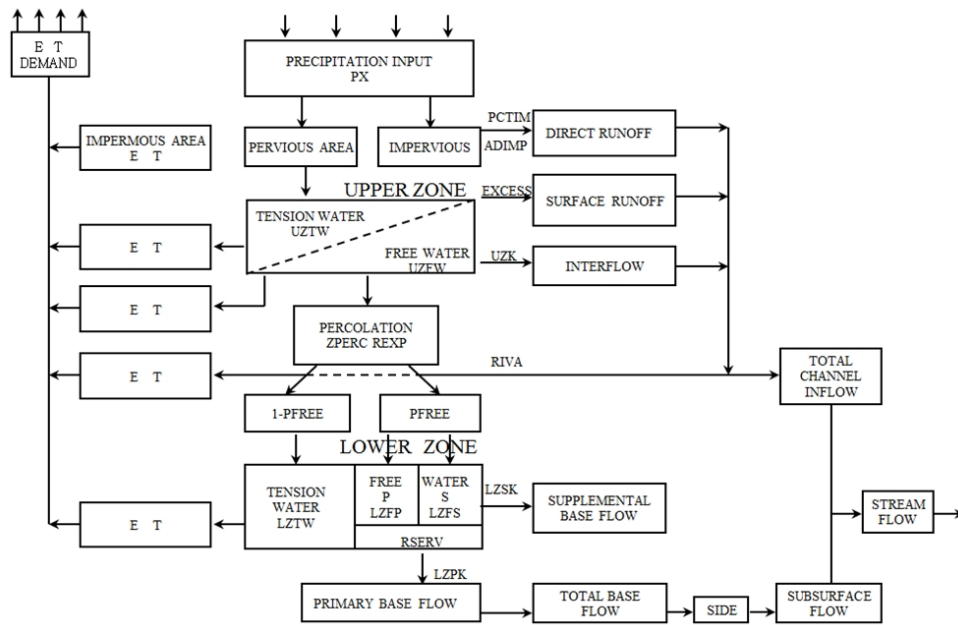


Fig. 3. Schematic Diagram of Sacramento Soil Moisture Accounting Model (Tabios III et al., 1986)

토양입자에 부착된 부착수(tension water)로 이루어진다.

그리고 하층부는 다시 두 가지로 나누어져서, 장기간의 기저유출을 모의하는 기본 자유수(primary free water)와 상대적으로 최근에 발생한 강우에 의해 나타나는 보조 자유수(supplemental free water)로 존재한다. 모형에서 고려하는 물 배분의 개념은 먼저 부착수 성분이 먼저 채워지고 나서 자유수 성분이 공급되는 것이다. 부착수는 증발산에 의해서만 탈수(depletion)되며 자유수는 침투와 증발산에 의해 탈수된다. 상층부에서 하층부로 이동하는 침투현상은 상층부 가용수분과 하층부 수분 부족량의 함수이다.

토양함수상태계산 모형에서 모의 계산되는 유출 성분은 다음의 다섯 가지로 구분된다.

- (1) 영구적인 또는 일시적인 불투수 영역으로부터 유출되는 직접 유출(direct runoff)
- (2) 상층부의 자유수 저류지가 포화되거나, 강우강도가 침투 및 중간유출률을 초과할 때 발생하는 지표면 유출(surface runoff)
- (3) 상층부의 자유수에서 배수되는 중간유출(interflow)
- (4) 보조 기저유출(supplemental base flow)
- (5) 기본 지저유출(primary base flow)

처음 3개의 유출 성분은 지표면 유출에 의한 유입량으로 운동과 추적법이나 단위도-Muskingum 방법 중 사용자의 선택에 의해 계산된다. 마지막 2개의 성분은 토양수분에 대한 선형감쇠 가중함수(linear decay weighting function)로 계산한 후 지표하 유출(subsurface flow)의 형태로 하천으로 유입되므로, 이 유출량을 모두 합산하면 유역 출구에서의 총 하천 유출량이 된다.

NWS-PC 모형의 추적방법은 운동과로서 유역의 사면과 하도를 추적할 수 있고, 단위도-Muskingum 방법을 조합하여 추적할 수도 있다. 본 연구에서는 1시간 단위의 유출량 모의를 수행하기 위하여 보다 정확하다고 판단되는 운동과 추적법을 사용하였다. 지표면 흐름이나 하천의 1차원 흐름은 Saint-Venant 방정식으로 나타낼 수 있으며, 이것은 연속방정식과 운동량 방정식으로 구성된다. 연속방정식과 운동량방정식을 연립하여 Eq. (1)과 같이 유출해석을 수행할 수 있다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \alpha \beta A^{(\beta-1)} \frac{\partial A}{\partial x} = q \quad (1)$$

여기서, A 는 흐름 단면적(m^2), t 는 시간(sec), α 와 β 는 조도계수와 흐름의 단면특성에 따라 결정되는 계수, x 는 흐름방향으로의 거리(m), q 는 보통 초과 강우량(excess rainfall)으로 일컬어지는 총

하도 유입량(m^3/s)이거나 측방 유입량(m^2/s)이다. Eq. (1)은 지표면 흐름이나 하도 추적의 지배방정식이 되며, 이 식의 수치해는 유한차분 양해법을 사용한다. 총 하도 유입량 q 는 지표면 흐름 요소를 통하여 추적되며, 이때의 흐름요소는 다양한 하천단면 중 넓은 사각형 하도(wide rectangular channel)로 취급하여 $\alpha = S^{1/2} \cdot n$, $\beta = 5/3$ 이 된다. 그리고 지표면 흐름요소의 유출량은 집수하도가 있을 경우에 이 하도의 유입량이 하도추적 된다. 다시 집수하도의 유출량을 주하도의 유입량으로 하여 하도추적을 하면 최종적으로 유역출구의 지표흐름 유출량이 된다.

3. 적용 결과

3.1 자료의 구축

Fig. 4와 같이 임진강 중류부에 위치한 연구 대상유역의 유역출구인 임진교 수위관측소의 유역면적은 4,228.71 km^2 이며, 유로연장은 191.82 km 이다. 1996년 관측개시일 이후부터 지속적으로 수위관측을 하고 있다. 한탄강 합류점으로부터 7.02 km , 한탄강 합류 이전 임진강 본류에 위치한 관측소로 북한의 4월5일댐과 황강댐의 저류 및 방류 시 직접적인 피해를 입는 지역으로 댐 건설 영향에 따른 유출량 산정을 위한 최적의 관측소로 볼 수 있다. 2007년 12월경 완공되어 담수가 시작된 것으로 확인된 황강댐은 군사분계선으로부터 42.3 km 북쪽에 위치하며, 저수용량 3~4

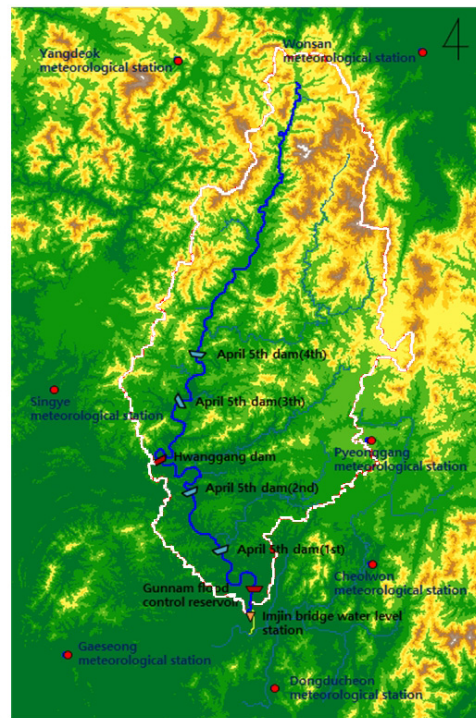


Fig. 4. Map of the Imjin River Basin

억³(약 3.5억³) 규모의 다목적댐이다. 황강댐 유역면적은 2,822.40km²으로 임진강 전체 유역면적 8,117.50km²의 35%에 달한다. 대상유역 인근에는 7개의 수문관측소가 있으며, 황강댐 상·하류에 중·소형 발전용 댐인 4월5일댐(총 4기, 2001~2002년 완공)이 있다.

본 연구에서는 북한의 원산관측소 등 5개 관측소와 남한의 철원 관측소 등 2개 관측소의 강우량 자료와 기상자료를 수집하고, 모형의 입력자료인 강우량 자료와 증발산량 자료를 구축하였다. 북한의 5개 관측소의 원시 강우량 자료의 시간간격은 12시간과 6시간이며, 기상자료는 3시간 간격이다. 남한의 2개 관측소의 최소 시간간격은 10분이다. 보다 정확한 모의 유출량 분석을 통해 도달시간을 산정하려면 최소 1시간 간격의 자료가 요구된다. 북한의 5개 관측소의 강우량 자료에 대해서는 MLTM(2011)에 제시한 지속기간별 실측 시간분포 방법을 적용하였다. 기상자료는 선형보간법에 의해 결측 자료를 보완하였으며, 3시간 간격의 자료를 균등 분할하여 1시간 간격의 자료를 생성하였다. 각 관측소별 강우량 자료는 역거리법을 이용하여 결측을 보완하고, 티센가중법을 적용하여 유역평균강우량을 생성하였다. 그리고 1시간 간격의 기상자료를 토대로 FAO Penman-Monteith 방정식을 이용하여 증발산량을 산정하였다. 유역출구인 임진교 수위관측소의 1시간 간격의 관측유출량 자료의 검토를 통해 모형의 입력자료를 1999년부터 2017년까지 구축하였다. 구축된 자료를 토대로 전기간의 물수지를 Table 1과 같이 나타내었으며, 총 강우량 대비 하천유출은 55.7%, 증발산량은 32.4%, 지하수 함양량은 11.9%의 비율을 보이는 것으로 분석되었다.

3.2 모형의 검정과 검증

NWS-PC 모형의 토양함수상태계산 부모형의 매개변수는 수문곡선을 분석하여 추정하는 수동보정과 제약 Rosendrock 최적화 알고리즘 기반의 자동보정 기능으로 보정할 수 있다. 본 연구에서는 Brasil et al.(1980)가 제안한 수동보정과 자동보정의 조합 시 발생하는 불이익을 극복하기 위하여 초기는 수동보정으로, 중간은 자동보정으로, 최종은 두 방법을 조합하여 보정을 수행하였다 초기 모형의 매개변수를 얻기 위하여 NWS-PC 모형의 매뉴얼에 기술된 절차에 따라 관측 수문곡선과 전 유역의 토양특성과 모형 매개변수

간의 관계를 분석하였다. 수동보정은 관측과 모의발생 흐름간의 오차를 시행착오법으로 수행되며, 자동보정은 Eq. (2)와 같이 관측 및 모의발생 흐름간의 시간대별 편차제곱합을 최소화하는 목적함수를 설정하여 직접탐색법에 의해 최적치를 구하는 최적화 기법에 의해 수행된다. 자동보정되는 매개변수는 사용자가 임의로 선정하도록 되어있다.

$$\text{Min } \sum (Q_{obs} - Q_{cal})^{2.0} \quad (2)$$

여기서, Q_{obs} 는 관측유량, $Q_{cal} = Q(\Pi, \theta)$ 는 계산유량을 나타낸다.

제약조건으로는

$$\theta_{min} \leq \theta \leq \theta_{max} \quad (3)$$

여기서, θ_{min} 과 θ_{max} 는 각 매개변수의 상·하한값을 나타내고, Π 는 입력자료, 즉 강우량을 나타낸다. NWS-PC 모형의 매개변수 초기값 추정과 검증은 4월5일댐과 황강댐 건설 이전인 1999~2000년 수문자료를 이용하여 NWS-PC 모형의 매뉴얼에 따라 침투유출량 및 침투유출발생시간의 관측값과 모의값의 오차를 최소화하는 방법으로 수행하였다. 운동과 추적 부모형의 매개변수는 지리정보시스템 도구를 이용하여 추출한 값을 사용하였으며, 지형자료는 SRTM 자료를 이용하였다(http://strm.csi.cgiar.org).

1999~2000년은 임진강 상류에 위치한 4월5일댐과 황강댐 건설 이전 기간으로 인위적인 대규모 수공구조물에 의한 영향을 받지 않는다. 이에 따라 강우에 의한 유출량을 정확하게 산정할 수 있기 때문에 이 기간을 검정기간으로 설정하였다. 그리고 검증기간은 2001~2005년으로 설정하였으며 그 이유는 다음과 같다. 검증기간은 인위적인 하천유출량의 저류와 방류가 있었던 기간이나, 4월5일댐 총 저수용량(87.7백만³)보다 큰 황강댐이 완공된 2007년 이전(2006년은 황강댐 건설기간 중으로 공사에 따른 유출량의 변화가 예상되므로 검증기간에서 제외함)으로 검증기간을 제한하였다. 4월5일댐은 중·소형 발전용 댐으로 발전에 사용된 유출량은 다시 유역내로 환원되기 때문에 장기적인 관점에서 볼 때, 유역의 유출량

Table 1. Results of Water Balance Analysis (Imjin Bridge Water Level Station, Average)

Elements		Runoff depth (mm)	Ratio (%)	Remarks
Inflow	Rainfall	1,374.0	-	Rainfall data analysis
	Runoff	765.4	55.7	Water level observation data and discharge conversion result
Outflow	Evapotran-spiration	444.8	32.4	FAO Penman-Monteith equation application
	Groundwater recharge	163.8	11.9	Estimation

손실은 없다.

Table 2와 Figs. 5(a) and 5(b)에서 보는 바와 같이 모형의 검정기간인 1999~2000년의 모의값은 유효유출량에서 관측값과 약 1.5%의 차이를 보이는 것으로 분석되었다. 모의 수문곡선의 형상은 관측 수문곡선과 유사한 경향을 보였으나, 저수위의 유출량과 일부 호우사상에서 다소 차이를 보였다. 그리고 검정기간의 초기인 1999년 1~3월의 자료는 안정적인 해를 찾아가는 과정에 해당하므로 불안정한 값을 보였으나 그 이후에는 안정적인 특성을 나타내었다. 모형의 검증기간인 2001~2005년의 경우 모의값은 유효유출량에서 관측값과 약 0.9% 차이를 보이는 것으로 분석되었다. 모의와 관측 수문곡선의 형상은 매우 유사하였으며, 검정기간과 같이 저수위의 유출량과 일부 호우사상에서 차이를 보이는 것으로

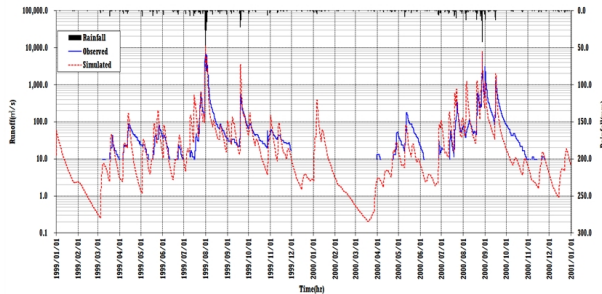
분석되었다.

검증기간 중 2001년에는 4월5일댐의 1호기(저수용량 20백만 m^3)와 2호기(저수용량 7.7백만 m^3), 2002년에는 4월5일댐의 3호기(저수용량 30백만 m^3)와 4호기(저수용량 30백만 m^3)의 완공이 있었으며, 댐 건설 중에 조절된 일부 유출량 및 2001년 10월과 2005년 9월의 무단방류의 영향으로 관측자료의 불확실성이 존재하는 기간이다. 그러나 모의값 산정결과는 검증기간이 5년으로 장기간이지만 양호한 결과를 보이는 것으로 분석되었다.

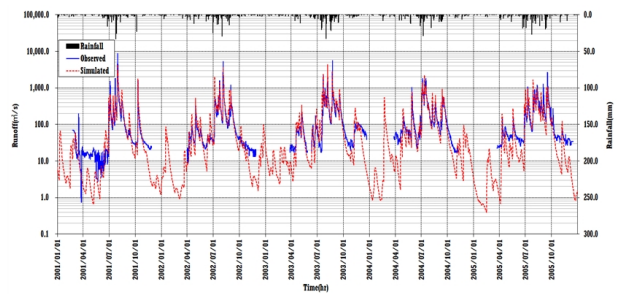
검정기간과 검증기간의 통계값은 Table 3에 나타내었으며, 검증기간은 검정기간보다 모형의 효율성 개선과 적은 오차의 결과를 보이는 것으로 분석되었다. 검증을 통해 산정된 강우-유출 모형의 매개변수는 도달시간 산정을 위한 기준이 되는 값이다(Kim, 2018).

Table 2. Comparison of Observed Runoff and Simulated Runoff (1999~2000, 2001~2005)

Items		1999~2000		2001~2005		Remarks
		Totality	Validity	Totality	Validity	
Observed value	Total runoff (10 ⁸ m ³)	-	48.9	-	170.6	○ Number of unmeasured data - 1999~2000 : 7,732 (323 days) - 2001~2005 : 13,689 (580 days)
	Runoff depth (mm)	-	1,155.6	-	4,033.2	
Simulated value	Total runoff (10 ⁸ m ³)	55.6	48.2	179.8	172.1	
	Runoff depth (mm)	1,314.5	1,138.7	4,252.4	4,069.5	
Ratio (%)	Total runoff (10 ⁸ m ³)	-	98.5	-	100.9	○ Simulated value / Observed value
	Runoff depth (mm)	-	98.5	-	100.9	



(a) Calibration Period (1999~2000)



(b) Verification Period (2001~2005)

Fig. 5. Comparison of Observed Hydrograph and Simulated Hydrograph (Imjin Bridge Water Level Station)

Table 3. Statistical Analysis of Calibration and Verification Period

Items	NSE	RMSE (m ³ /s)	MAE (m ³ /s)	RE (%)	R ²
Calibration (1999~2000)	0.740	246.573	84.091	1.466	0.755
Verification (2001~2005)	0.780	170.942	58.798	0.900	0.782

3.3 자연하천의 도달시간 산정

지형학적 인자와 경사별 유속을 이용한 자연하천에 대한 도달시간 산정은 Kerby 공식, Kirpich 공식, Rziha 공식, Kraven (I) 공식, Kraven (II) 공식, 연속형 Kraven 공식을 적용할 수 있다. Kerby 공식, Kirpich 공식, Rziha 공식, Kraven (I) 공식은 단일값을 갖는 도달시간만을 산정할 수 있으며, Kraven (II) 공식은 3개로 구분된 유역경사에 대응하는 도달시간을 산정할 수 있다. 그리고 연속형 Kraven 공식도 2개의 유역경사의 구분과 유속의 최소값과 최대값을 갖는 도달시간을 산정할 수 있다. Table 4는 황강댐과 임진교 수위관측소에 대해 각 공식을 적용한 도달시간을 산정하였으며, 2개 구간의 차이값에 대한 구간 도달시간도 함께 기술하였다. 여기서 Kerby 공식, Kirpich 공식은 조건에 부합되지 않아 적용에 한계가 있으며, Kraven (I) 공식은 다른 공식에 비해 과대한 값을 보이고 있다. 황강댐과 임진교 수위관측소의 구간의 유역평균경사(0.1854)는 1/100 이상이므로 Kraven (II) 공식의 도달시간은 5.3시간이며, 연속형 Kraven 공식은 V_{max} 의 값을 적용한 4.1시간의 도달시간이 산정된다. 따라서, Rziha 공식의 3.7시간, Kraven (II) 공식의 5.3시간, 연속형 Kraven 공식의 4.1시간이 대상유역에 적합한 단일한 값을 갖는 도달시간으로 판단할 수 있다.

또 다른 도달시간 산정방법인 Jeong et al.(2002)이 제시한 Jeong 공식(정밀)과 Yoo et al.(2011)이 제시한 공식은 강우의 재현기간에 따라 도달시간을 산정할 수 있다. 그러나 본 연구에서

제시하는 강우-유출 모형을 적용할 경우 강우의 재현기간 뿐만 아니라 초기의 토양함수상태 조건에 대해서도 도달시간 산정이 가능하기 때문에 수문-지형학적 인자를 최대한 활용한 도달시간을 산정할 수 있다.

Table 5는 강우의 재현기간에 따라 Jeong et al.(2002)이 제시한 Jeong 공식(정밀)과 Yoo et al.(2011)이 제시한 공식을 임진강 유역의 황강댐과 임진교 수위관측소에 적용하여 산정한 도달시간 값이며, 본 연구값은 강우의 재현기간에 따른 토양함수상태별 도달시간을 산정한 값이다. 임진교 수위관측소와 황강댐 구간의 도달시간은 Jeong et al.(2002)이 제시한 Jeong 공식(정밀)의 경우 9.8~7.4시간이 산정되었으며, Yoo et al.(2011)이 제시한 공식의 경우에는 5.3~3.4시간으로 산정되었다. 본 연구는 강우 초기 토양함수상태 10%에서 4.6~2.5시간, 50%에서 4.3~2.4시간, 90%에서 3.8~1.2시간으로 산정되었다. 본 연구의 강우 초기 토양함수상태 10%의 값은 Yoo et al.(2011)이 제시한 공식과 유사한 값을 보이는 것으로 분석되었다. 그러나 Jeong et al.(2002)이 제시한 Jeong 공식(정밀)은 본 연구결과와 Yoo et al.(2011)이 제시한 공식의 값과는 차이를 보이고 있다.

Jeong et al.(2002)이 제시한 Jeong 공식(정밀)은 일반화된 평균 유속과 재현기간 50년을 기준으로 갖는 도달시간을 산정하는 반면, Yoo et al.(2011)이 제시한 공식은 Sherman형 강우강도식과 지역 상수를 토대로 도달시간을 산정한 값이다. 따라서 Yoo et al.(2011)

Table 4. Results of Travel Time (Formula that Considers Only Topographical Factors and Velocity)

Items	Formula (min)	Remarks	Value (hour)			
			HG.D (a)	IJ.B (b)	(b)-(a)	
Kerby	$T_c = 36.264 \frac{(LN)^{0.467}}{S^{0.2335}}$	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Basin area : within 0.04km² ▶ River length : within 0.4km 	5.5	7.5	2.0	
Kirpich	$T_c = 3.976 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Cropland small basin, where the surface flow is dominant ▶ River channel slop : 3~5% ▶ Basin area : within 0.453km² 	4.3	7.1	2.9	
Rziha	$T_c = 0.833 \frac{L}{S^{0.6}}$	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Upstream surface flow is dominant ▶ Basin with a channel slop less than 1/200 	3.5	7.1	3.7	
Kraven (I)	$T_c = 0.444 \frac{L}{S^{0.515}}$	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Middlestream and downstream surface flow is dominant ▶ Basin with a channel slop less than 1/200 	1.7	3.3	1.6	
Kraven (II)	$T_c = 16.667 \frac{L}{V}$	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Applied velocity of slope of natural river - $S < 1/200$: $V = 2.1m/s$ - $1/200 \leq S \leq 1/100$: $V = 3.0m/s$ - $S > 1/100$: $V = 3.5m/s$ 	$V = 2.1m/s$	16.5	25.4	8.9
			$V = 3.0m/s$	11.5	17.8	6.2
			$V = 3.5m/s$	9.9	15.2	5.3
Continues type Kraven	$T_c = 16.667 \frac{L}{V}$	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Steep slope($S > 3/400$) - $V = 4.592 - \frac{0.01194}{S}$, $V_{max} = 4.5m/s$ ▶ Mild slope($S \leq 3/400$) - $V = 35,151.515S^2 - 79.393939S + 1.6181818$, $V_{min} = 1.6m/s$ 	V_{max}	7.7	11.8	4.1
			Steep slope	7.6	11.8	4.2
			V_{min}	21.6	33.3	11.7

Table 5. Results of Travel Time (by Frequency or Soil Moisture Accounting)

Frequency (year)	Jeong et al. formular (detailed)			Yoo et al. formular			This study								
	HG.D (a)	IJ.B (b)	(b-a) (hour)	HG.D (c)	IJ.B (d)	(d-c) (hour)	HG.D (e)			IJ.B (f)			(f-e) (hour)		
							10%	50%	90%	10%	50%	90%	10%	50%	90%
2	19.0	28.8	9.8	13.5	8.2	5.3	36.8	36.8	36.8	41.4	41.1	40.6	4.6	4.3	3.8
5	17.6	26.7	9.1	11.8	7.1	4.7	35.2	35.2	34.2	39.3	39.1	37.4	4.1	3.9	3.2
10	16.8	25.6	8.8	10.9	6.6	4.3	34.0	34.1	32.3	37.7	37.6	35.1	3.8	3.6	2.7
20	16.1	24.5	8.4	10.2	6.1	4.1	32.8	33.0	30.6	36.2	36.2	32.9	3.4	3.3	2.3
30	15.7	23.9	8.2	9.8	5.9	3.9	32.2	32.3	29.6	35.4	35.4	31.7	3.2	3.1	2.1
50	15.3	23.3	8.0	9.4	5.6	3.8	31.3	31.6	28.4	34.4	34.5	30.2	3.0	2.9	1.9
80	14.9	22.7	7.8	9.0	5.4	3.6	30.6	30.8	27.3	33.4	33.6	30.2	2.8	2.7	1.6
100	14.7	22.4	7.8	8.9	5.3	3.6	30.3	30.5	26.8	33.0	33.2	28.4	2.7	2.6	1.5
200	14.2	21.6	7.4	8.5	5.1	3.4	29.2	29.5	25.4	31.7	31.9	26.6	2.5	2.4	1.2

이 제시한 공식으로 산정된 도달시간은 강우의 조건을 충분히 반영한 값이라 볼 수 있다. 그리고 본 연구에서 제시된 도달시간 산정값도 대상유역의 강우조건에 따른 침투유출발생시간을 재현하는 모형을 적용한 것이므로 역시 강우조건을 잘 반영하고 있으며, 강우 초기의 토양함수상태를 고려할 수 있는 장점을 가지고 있다.

3.4 방류량 조건별 도달시간 산정

방류량 조건은 황강댐에서 초당 500m³~10,000m³의 11개 조건으로 방류하였을 경우, 유역출구인 임진교 수위관측소에 미치는 침투유출발생시간, 즉 도달시간을 산정하였다. 도달시간 산정은 검증을 통해 확정된 매개변수를 갖는 강우-유출 모형을 이용하였으며, 황강댐과 임진교 수위관측소 구간의 모형 매개변수는 다음과 같이 결정하였다. 임진교 수위관측소에 대해 산정된 토양함수상태 계산 부모형 매개변수는 그대로 사용하되, 상층부와 하층부의 최대저류용량은 유역면적비 33.3% (황강댐과 임진교 수위관측소 구간의 유역면적은 1,406.31km²임)를 적용하였으며, 상층부와 하층부

의 초기수 값도 상층부와 하층부의 최대저류용량과 동일한 값을 적용하였다.

이러한 이유는 유역전체가 100% 포화된 토양함수상태의 조건을 부여한 것으로 발생된 강우량이 모두 하도로 유입되어 유출이 발생하는 상황을 묘사한 것이다. 이것은 황강댐 방류량이 하도를 통해 100% 하류로 유하 한다는 것과 같은 의미이다. 예로 충주다목적댐의 경우에는 방류량별 하류 주요지점의 도달시간을 알 수 있지만 그렇지 못한 상황에서의 이러한 조건의 설정은 유의성을 갖는다고 할 수 있다. 그리고 운동과 추적 부모형의 매개변수는 황강댐과 임진교 수위관측소 구간의 지형인자 값을 적용하였다. 강우-유출 모형의 입력자료인 강우량의 지속기간은 1시간으로 하였으며, 모의기간 동안 증발산량은 발생하지 않았다고 가정하였다. 모의유출량의 결정은 침투유출량이 해당 방류량에 최대로 근접할 때까지 반복 시행하였으며, 이때의 침투유출발생시간, 즉 도달시간을 산정하였다(Kim, 2018).

Table 6과 같이 황강댐의 방류량 조건별 도달시간은 13시간(방

Table 6. Calculation of Peak Runoff and Travel Time of the Imjin Bridge Water Level Station by Outflow Conditions of the Hwanggang Dam (the Basin Rainfall Inclusion)

Outflow (m ³ /s)	Rainfall (mm)	Imjin bridge water level station			Outflow (m ³ /s)	Rainfall (mm)	Imjin bridge water level station		
		Peak runoff (m ³ /s)	Travel time (hour)	Section average velocity (m/s)			Peak runoff (m ³ /s)	Travel time (hour)	Section average velocity (m/s)
500	35.0	500.7	13	1.44	6,000	157.2	5,999.7	5	3.74
1,000	54.1	1,001.6	9	2.08	7,000	169.7	7,003.4	4	4.68
2,000	80.0	2,000.8	7	2.67	8,000	180.8	8,001.0	4	4.68
3,000	106.8	3,002.1	6	3.12	9,000	191.7	9,003.1	4	4.68
4,000	125.3	3,999.4	5	3.74	10,000	202.5	10,004.5	4	4.68
5,000	141.2	4,998.6	5	3.74					

류량 500m³/s, 구간 평균유속 1.44m/s)~4시간(방류량 10,000m³/s, 구간 평균유속 4.68m/s)으로 산정되었다. 황강댐의 방류량 7,000m³/s 이상에서는 더 이상 도달시간이 감소하지 않고 일정한 값을 갖는 것으로 산정되었다. 강우-유출 모형의 모의 시간간격은 1시간 단위 이므로, 1시간 이하의 도달시간을 산정할 수 없는 한계를 내포하고 있다. 부가적으로 황강댐의 각 조건별 방류량에 해당하는 지속기간 1시간의 발생 강우량 35.0mm(방류량 500m³)~202.5mm(방류량 10,000m³)가 유출에 기여하였을 경우, 임진교 수위관측소에 500.7~10,004.5m³/s의 침투유출량을 발생시키는 것으로 분석되었다.

4. 결론

설계홍수량 산정 및 수문모형 구축 시 도달시간과 같은 시간매개 변수 결정은 매우 중요한 과정이다. 본 연구에서는 도달시간에 대한 정의를 고찰하고, 기 개발된 도달시간 공식을 대상유역에 적용하여 도달시간을 산정하였다. 초기의 도달시간 공식은 지형인자만을 적용하는 것과 지형인자와 함께 유역경사 구분에 따른 유속값을 적용하는 것으로 구분된다. 이후 일반화된 평균유속과 재현기간별 강우조건, 강우강도식과 지역상수를 고려한 개선된 도달시간 공식이 개발되었다.

도달시간 산정 시 고려될 수 있는 인자로는 지형학적 특성자료, 유속, 강우강도(재현기간별 포함) 이외에 토양의 초기함수조건도 관련이 있다. 본 연구의 도달시간 산정은 강우-유출 모형인 NWS-PC 모형을 이용하여 검증된 매개변수를 토대로 재현기간별 강우조건과 강우초기의 토양함수상태를 동시에 고려하였으며, 기 개발된 공식과 비교-검토하였다. 그 결과 본 연구에서 산정된 도달시간은 수문-지형학적 인자를 반영한 매우 유의미한 값을 갖는 것으로 분석되었다.

그리고 임진강 상류에 위치한 황강댐의 방류량 조건에 따라 하류에 위치한 임진교 수위관측소에 도달하는 시간을 산정하였다. 산정결과 인 13시간(방류량 500m³/s)~ 4시간(방류량 10,000m³/s) 범위의 도달시간은 자연하천상태의 도달시간과 함께 임진강 유역의 홍수관리와 황강댐의 무단방류를 포함하는 방류 시 사고 위험에 대비할 수 있는 시간을 확보한다는 의미에서 가치가 있다고 판단된다. 향후 연구에서는 임진강 상류 유역의 강우량자료에 대한 적정 시간분포 방법을 개발하고, 지역빈도해석을 통해 얻어진 강우조건별 자료와 수문-지형학적 인자를 최대로 활용한 도달시간을 산정할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “수해재 방제 대응을 위한 수문조사”의 일환으로 수행되었습니다.

References

Bedient, P. B. and Huber, W. C. (1988). “Hydrology and flood-plain analysis.” *Addison-Wesley Publishing Company*, New York.

Bedient, P. B. and Huber, W. C. (1992). “Hydrology and floodplain analysis.” *Addison-Wesley*, Reading, Mass.

Bell, F. C. and Omakar, S. (1969). “Characteristic response times in design flood estimation,” *Journal of Hydrology*, Vol. 8, pp. 173-196.

Brasil, L. E. and Hudlow, M. D. (1980). “Calibration procedures used with the national weather service river forecast system,” *Water and related Land Resource Systems*, Cleveland, Ohio, pp. 457-466.

Jeong, J. H., Keum, J. H. and Yoon, Y. N. (2002). “Development of estimation method for travel time.” *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 35, No. 6, pp. 715-727 (in Korean).

Kim, D. P. (2018). *Analysis of the influence on downstream runoff due to upstream dam operation of the Imjin river*, Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Korea (in Korean).

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). (1994). *Determination of hydraulic and hydrological factors for the forecasting of flood runoff - focused on Clark and Nash methods -*, No. 94-WR-113 (in Korean).

Korea Water Resources Association (KWRA). (2009). *River design standard-commentary* (in Korean).

McCuen, R. H., Wong, S. L. and Rawls, W. J. (1984). “Estimation urban time of concentration.” *Journal of Hydrology, ASCE*, Vol. 110, No.7, pp. 887-904.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2011). *Improvement and Supplementation of Probability Rainfall*, No. 11-1611000-001995-01 (in Korean).

National Institute for Disaster Prevention (NIDP). (2013). *(Development of technology for reducing damages of small river facilities based on real experiments) quantification of design element for reduction in small river damage*, No. 11-1312184-000031-01 (in Korean).

Pilgrim, D. H. (1966). “Radioactive tracing of storm runoff on a small catchment: 1. experimental technique.” *Journal of Hydrology*, Vol. 4, pp. 289-305.

SCS. (1975). “Urban hydrology for small watersheds, technical release, No. 55.” Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture.

Singh, V. P. (1976). “Derivation of time of concentration.” *Journal of hydrology*, Vol. 30, issues 1-2, pp. 147-165.

STRM, <http://srtm.csi.cgiar.org>. (Accessed: June 21, 2018)

Tabios III, G., Obeysekera, J. T. and Salas, J. D. (1986). “National Weather Service Model : PC version, program and manual.” assembled by *Hydrology and Water Resources Program*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, pp. 1-137.

Yoo, D. H., Kim, J. H., Lee, M. H. and Lee, S. H. (2011). “The time of concentration considering the rainfall intensity.” *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 44, No. 7, pp. 591-599 (in Korean).