

장기 용·적설을 고려한 파키스탄 Kunhar강 유역 K-DRUM모형 구축 및 적용

박진혁* · 허영택** · 노준우*** · 김세원****

Park, Jin Hyeog*, Hur, Young Teck**, Noh, Joon Woo***, Kim, Seo-Won****

Application of K-DRUM Model for Pakistan Kunhar River Basin Considering Long-term Snow Melt and Cover

ABSTRACT

In this study, physics based K-DRUM(K-water Distributed RUoff Model) using GIS spatial hydrologic data as input data was developed to account for the temperature variation according to the altitude change considering snow melt and cover. The model was applied for Pakistan Kunhar River Basin(2,500km²) to calculate long-term discharge considering snow melt and cover. Time series analysis of the temperature and rainfall data reveals that temperature and rainfall of the river basin differs significantly according to altitude change compared to domestic basin. Thus, applying temperature and altitude lapse rate during generate input data generation. As a result, calculated discharge shows good agreement with observed ones considering snow melt and accumulation characteristic which has the difference of 4,000 meter elevation above sea level. In addition, the simulated discharge strongly showed snow melting effect associated with temperature rise during the summer season.

Key words : K-DRUM, Snow melt and cover, Kunhar river, Discharge

초록

본 연구에서는 GIS 공간 수문자료를 입력 자료로 활용하는 물리적기반의 분포형 강우유출모형(K-DRUM, K-water Distributed RUoff Model)을 고도분포에 따른 기온변화와 용·적설 모의가 가능하도록 확장 개발하여 파키스탄 Kunhar강 유역(2,500km²)을 대상으로 용·적설을 고려한 장기 유출량 모의결과를 비교 분석하였다. 기온 및 강우 시계열 자료 분석 결과 동일한 유역 내 표고에 따른 기온 및 강우차가 국내유역과는 달리 매우 심하게 나타나 기온 및 고도감율을 적용하여 모형의 입력값으로 산정하였다. 해발고도 4,000m차이의 용·적설 특성을 반영한 유출량 재현성은 비교적 양호하였으며, 연중 유출패턴은 여름철 기온상승에 의해 용설로 인한 유출이 강하게 나타나고 있었다.

검색어 : 분포형모형(K-DRUM), 용·적설, Kunhar강, 유출량

* 정회원·교신저자·한국수자원공사 K-water연구원 책임연구원

(Corresponding Author·Korea Water Resources Corporation·park5103@kwater.or.kr)

** 정회원·한국수자원공사 K-water연구원 선임연구원 (korcivil@kwater.or.kr)

*** 정회원·한국수자원공사 K-water연구원 책임연구원 (jnoh@kwater.or.kr)

**** 한국수자원공사 K-water연구원 책임연구원 (kimseaa@kwater.or.kr)

Received March 8, 2013/ revised April 30, 2013/ accepted August 28, 2013

1. 서론

컴퓨터 기반의 수문모델링에 대한 필요성이 대두된 이래 수문모델링은 지난 30년간 운영 목적과 사회적 요구에 맞게 지속적으로 개발되어 왔다. 개발초기부터 현재까지 간소한 입력 자료와 빠른 구동시간, 간단한 해석 알고리즘 등으로 인해 집중형, 개념적, 결정론적 수문모형들이 많이 사용되고 있다(Kim, 1998). 그러나 이러한 모형은 지역에 특화된 경험적인 상수의 산출 및 적용을 필요로 하며 지역적 특성의 불균질성을 고려하지 못한다는 단점이 있다. 최근 전 세계적으로 GIS 및 위성영상을 이용한 유역에 대한 상세한 수문매개변수 수집이 가능하게 되고 컴퓨터의 기능 향상과 복잡한 수치모의 기술의 발달로 인해 강우와 수문특성의 공간분포와 비균질성을 고려하여 유역유출을 계산할 수 있는 물리적 기반의 분포형 유출모형에 대한 활용도가 높아지고 있다(Park and Hur, 2008a; 2008b; 2009; Chung et al., 2010). 국내 개발된 다수의 물리적 기반의 분포형 모형 중에서 본 연구에서 활용한 K-DRUM모형은 운동과 이론과 유한차분법을 이용한 물리적기반의 격자 분포형 유출모형으로 당초 홍수기 댐 유입량 산정을 목적으로 개발되어 용담유역에 적용(Park and Hur, 2008b)한 것을 시작으로, 임진강(Park and Hur, 2009), 금강(Park and Hur, 2010) 및 낙동강 수계(Park et al., 2011) 등 대유역에서의 유출량 재현성을 평가하였으며, 그 결과 실무에서도 충분한 적용능력이 있음을 확인하였다. 그러나 용·적설이 발생하지 않는 홍수기 유출량 산정에는 적용이 가능하나, 겨울부터 다음해 봄까지 용·적설이 발행하는 고도가 높은 산악지형에는 적용이 어려워 증발산 및 용·적설 모듈을 추가하여 장기 유출모형으로 확장 개발하였으며 봄철 용설의 영향이 상대적으로 큰 광동댐 유역을 대상으로 유출량 모의를 수행한 바 있다(Kim et al., 2012).

용설 및 적설에 의한 유출을 모의하기 위해서 과거부터 많은 용설 모형이 개발되어 왔는데 개발된 모형들은 단순한 통계적 모형(Zuzel and Cox, 1975)에서 복잡한 분포형 모형(Morris, 1985)에 이르기까지 그 형태가 다양하고, 모형의 형식에 따라 요구되는 입력 자료도 다르다. 모형의 형식이 용설의 물리적 과정을 표현할 수 있고, 입력 자료가 풍부하고 정확하다면 모형의 결과는 정확할 것임은 분명하나, 국내의 용설에 관한 연구 현실을 감안하면 개념적 용설모형이 적절하다고 판단된다(Bae, 1998). 개념적 용설모형을 이용한 Bae (1998)는 미국 국립기상청의 온도지수 용설모형을 사용하고 강우-유출모형으로 SAC-SMA모형을 사용하여 우리나라 북부산간 지역인 내린천 유역에 적용하였다. Lee et al. (2003)의 연구에서는 강우-유출모형으로 수정 3단 탱크모형을 용설모형으로 Sugawara et al.(1984)의 용설모형을 사용하여 소양강 댐과 충주댐 유역에 대해 적용하였다. 또한 Kim et al.(2006)은

충주댐을 대상으로 SWAT모형을 이용하여 용설모의에 따른 유출 및 수문성분의 영향을 분석하였다. 국내 유역에 적용된 사례를 보면 대부분 용설모의를 고려한 경우의 모의 유량이 관측 유량과 더 근사하다고 밝혀 고도가 높은 산악지형의 경우 겨울과 봄의 용·적설에 대한 고려가 필수적이라 할 수 있다. 홍수기의 경우는 직접유출량이 기저유출에 비해 상대적으로 크기 때문에 증발산 및 용·적설 효과가 크게 나타나지 않지만, 봄, 가을, 겨울철의 경우에는 기저유출 비율이 상대적으로 크기 때문에 증발산 및 용·적설을 고려한 경우가 실제 유출량과 근사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 고도가 높고 해발고도 차이가 큰 지형특성을 가진 파키스탄 Kunhar강 유역을 대상으로 연간 유출량을 보다 정확히 재현하기 위해서 물리적 기반의 K-DRUM모형에 Sugawara et al.(1984)이 제안한 개념적 용설모형을 적용하여 관측 기온과 강수량을 고도에 따라 적설 또는 용설로 변환하여 용·적설을 고려한 유출량을 모의하였다.

2. K-DRUM모형의 구성

2.1 K-DRUM모형의 개요

K-DRUM모형은 자체 개발한 물리적기반의 분포형 유출모형으로 각 격자마다 물리적 특성값을 적용하여 강우에 따른 유역의 유출량을 격자별로 순차 계산하는 구조로 되어 있다. 연직구조는 A~B층의 수평유출량은 하천으로 유입하고, C층은 하천유출에 영향을 미치지 않는 지하수층으로 가정하였다(Fig. 1).

본 모형의 특성으로서는 DEM을 이용하여 격자기반으로 지형정

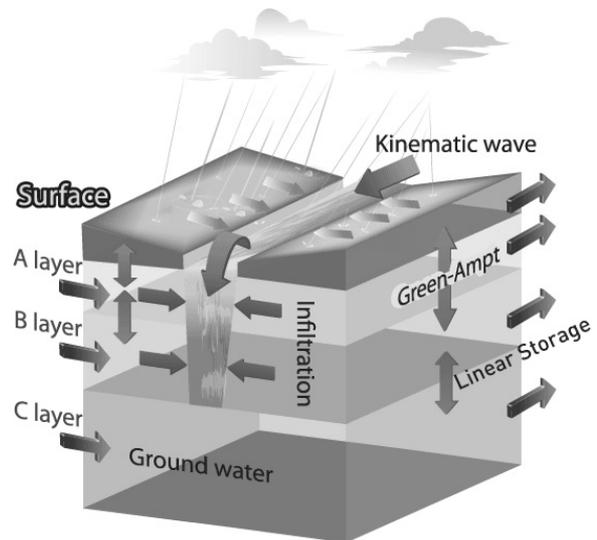


Fig. 1. Structure of the K-DRUM

보를 수치화하고 GIS를 이용하여 위성영상을 통한 실제 토양 및 토지피복에 대한 매개변수들을 추출하고, 실제와 근사한 하천흐름도를 추출하여 운동역학적인 이론을 기반으로 물의 흐름을 수리학적으로 추적하는 것이다. 또한, 침투능 공극을 통한 흐름과정으로 산정하고 홍수시 모의에서는 레이더강우 등의 격자기반의 분포형 강우를 입력할 수 있도록 설계되어 있다(Park and Hur, 2010).

지표 흐름 및 A층(얕은면 흐름)은 중간유출을 고려한 운동과법을 적용하였고, B층(지표하 흐름)과 C층(지하수 흐름)은 선형저류법을 적용하였다. 각층에서의 유출해석을 위한 지배방정식과 각각의 변수에 대한 내용은 다음과 같다(Beven, 1979).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r, \quad r = R + U_B - f \quad (1)$$

$$q = \begin{cases} \alpha(h - d_A)^m + \beta h \\ \alpha h \end{cases}, \text{ when } \begin{cases} h \geq d_A \\ h < d_A \end{cases}, d_A = \lambda_A D_A, m = \frac{5}{3} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{\sin\theta}}{n} \text{ (Manning type)},$$

$$\beta = \frac{k_A \sin\theta}{\lambda_A} \text{ (Darcy type)} \quad (3)$$

$$U_B = \begin{cases} S_B - d_B \\ 0 \end{cases}, \text{ when } \begin{cases} S_B - d_B \geq 0 \\ S_B - d_B < 0 \end{cases}, d_B = \lambda_B D_B \quad (4)$$

$$\frac{dS_B}{dt} = I_B - O_B, \quad I_B = f_A + U_C, \quad O_B = O_{h_B} + O_{v_B},$$

$$O_{h_B} = k_{h_B} S_B, \quad O_{v_B} = k_{v_B} S_B \quad (5)$$

$$U_C = \begin{cases} S_C - d_C \\ 0 \end{cases}, \text{ when } \begin{cases} S_C - d_C \geq 0 \\ S_C - d_C < 0 \end{cases}, d_C = \lambda_C D_C \quad (6)$$

$$\frac{dS_C}{dt} = I_C - O_C, \quad I_C = O_{v_B} + O_{CVP}, \quad O_C = O_{h_C},$$

$$O_{h_C} = k_{h_C} S_C \quad (7)$$

여기서, h : 수심(m), q : 단위폭당 유량(m²/sec), R : 강우강도(m/sec), f : Green-Ampt식으로 산출한 침투강도(m/sec), θ : 사면경사각, n : Manning의 조도계수, k_A : A층의 투수계수(m/sec), λ_A , λ_B , λ_C : A, B, C층의 공극율, D_A , D_B , D_C : A, B, C층의 유효토심(m), d_A , d_B , d_C : A, B, C층의 포화저류가능량(m), U_B : B층에서 A층으로 복귀하는 유량강도(m/sec), U_C : C층에서 B층으로 복귀하는 유량강도(m/sec), S_B , S_C : B, C층의 저류량(m), I_B , I_C : B, C층의 유입

강도(m/sec), O_B , O_C : B, C층의 유출강도(m/sec), O_{h_B} , O_{h_C} : B, C층에서의 횡방향 유출강도(m/sec), O_{v_B} : B층에서의 종방향 유출강도(m/sec), k_{h_B} , k_{h_C} : B, C층에서의 횡방향 투수계수(m/sec), k_{v_B} : B층에서의 종방향투수계수(m/sec), O_{CVP} : C층의 상류경계로 유입하는 유입유량강도(m/sec)

강우발생시 토양내부로의 침투강도를 계산하기 위한 Green-Ampt식의 수식은 다음과 같다.

$$F_t = k_s \Delta t + \psi(\theta_s - \theta_0) \ln \left(1.0 + \frac{F_t}{\psi(\theta_s - \theta_0)} \right),$$

$$f_t = k_s \left(1.0 + \frac{\psi(\theta_s - \theta_0)}{F_t} \right) \quad (8)$$

여기서, F_t : t 시간에서의 누가침투량(m), k_s : 유효투수계수(m/sec), Δt : 계산시간 간격(sec), ψ : 습윤선 흡입수두(m), θ_s : 포화 함수비, θ_0 : 초기 함수비, f_t : t 시간에서의 침투강도(m/sec)

2.2 용적설 산정기법

본 모형은 당초 홍수분석모형으로 개발하였으나, 최근에 증발산, 용적설 모듈 등을 추가 확장 개발하여 장기유출모형으로 개선하였다. 유역내 격자별 용적설량 산정에 대한 기본적 개념은 용적설을 구분하는 기준온도에 따라 대기온도가 상대적으로 낮으면 적설, 높으면 융설로 판단하는 간단한 구조로 표현 된다. 본 연구에서 용적설 산정에 사용한 방법은 Sugawara et al.(1984)이 제안한 Degree-day 방법에 경험적 상수가 포함된 온도 지수법(Temperature Index)으로 강수량과 대기온도와 기준온도 차이를 고려하여 다음과 같이 나타내었다.

$$\begin{cases} DSA = R(t) & , T_a \leq T_b \\ DS = \left(SMELT + \frac{1}{80} R(t) \right) \times (T_a(t) - T_b(t)), & T_a > T_b \end{cases} \quad (9)$$

여기서, DSA 는 시간당 적설량(mm/hr), $R(t)$ 는 시간당 강수량(mm/hr), $T_a(t)$ 는 시단위 평균 대기온도(°C), $T_b(t)$ 는 기준 온도(°C), DS 는 시간당 융설량(mm/hr), $SMELT$ 는 기온에 따른 시간당 융설량(mm/hr/°C)이다.

용적설을 판단하는데 중요한 요인인 대기온도는 고도에 따라 다르게 분포될 수 있으며, Yun et al.(2000)은 산악지대의 기온감률을 산정하기 위하여 아래 식과 같이 연중 날짜에 따른 기온감률

절대값 변화경향을 365일 주기의 함수로 표현하였다.

$$|\Gamma| = 0.00685 + 0.00135 \cos\{0.0172(i - 15)\} \quad (10)$$

여기서, Γ 는 기온감률(°C), i 는 Julian day, T_a 는 고도에 따른 기온감률을 고려하여 산정된 대기온도(°C), T_{sta} 는 기상관측소 관측 대기온도(°C)이다.

Eq. (10)에 의해 추정되는 고도 100m 상승에 따른 기온감률은 7월의 0.55°C부터 1월의 0.82°C로서 평균값은 표준대기의 평균감률 0.65°C와 크게 다르지 않다(Yun et al., 2000). Sugawara et al.(1984)도 고도가 100m 높아짐에 따라 기온이 0.5°C~0.6°C 저하한다고 밝힌바 있어 위 식은 적용하기에 적합할 것으로 판단된다. K-DRUM 모형에서 용·적설 모의 방법은 우선 기상관측소 관측기온을 토대로 모든 격자에 고도에 따른 기온감률을 적용하여 격자별 대기온도를 산정하고, 강수에 대해 격자별 용·적설을 각각 판단하게 된다.

3. 연구대상지 및 GIS 수문 매개변수 구축

3.1 연구대상지

본 연구 대상지는 파키스탄의 파트린드 지역에 있는 Kunhar강 유역으로 히말리아 산맥에 위치하고 있어 해발고도가 800~4,900m

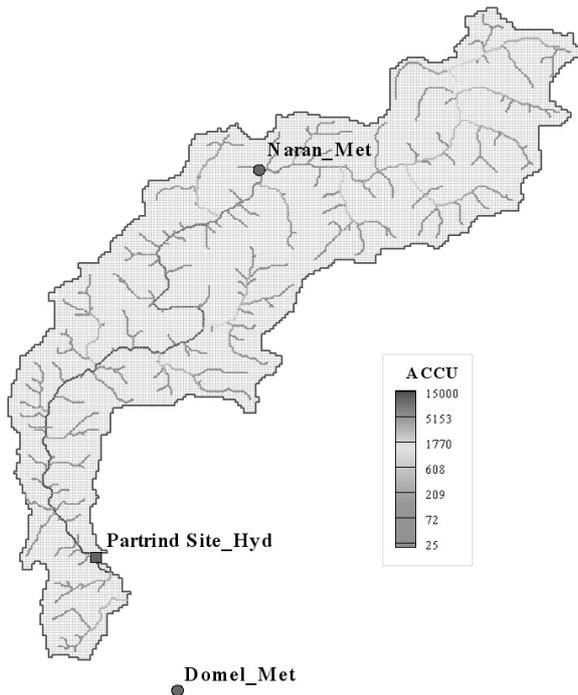


Fig. 2. Study Area

로 약 4,000m 이상의 표고차가 분포하는 등 고도가 높고 고도차가 크며 경사가 급한 지형특성을 가지고 있다. 이는 고도에 따른 기온차가 매우 크게 나타날 수 있으며, 특히 일정고도 이상에서는 강수가 눈의 형태로 존재하므로 연간 유출이 용·적설에 의해 지배적으로 나타나는 유역이다. 이 유역이 위치하고 있는 파트린드 지역은 K-water에서 이 지역의 전력난 해소를 목적으로 150MW규모의 수력발전소를 건설하는 대규모 프로젝트를 사업 중 진행 중이다. Kunhar강은 Jhelum강의 지류로서 약 126km의 유로연장을 가지며 전체 유역면적은 약 2,500km²에 달한다. Kaghan Valley로 둘러싸인 Babusar Pass 분수계의 남쪽부터 시작되며, 빙하로 덮인 해발 4,900m 지역의 물이 강으로 흘러내린다. 상류의 유역은 25km에서 30km로 다양하고 남쪽 아래로 내려올수록 좁아진다(No et al., 2012).

연구대상지 인근에 위치해 있는 관측소는 Fig. 2와 같이 분포되어 있고, 기상관측소는 2개소(Naran, Domel), 유량관측소는 1개소(Partrind Dam Site)가 위치하고 있다.

3.2 관측자료 분석

본 연구에서는 유역에서의 분포형 강우-유출모형을 적용함에 있어 모형의 중요 입력 자료인 강우에 대하여 시공간적인 강우분포를 유출계산에 모의하기 위해 Kunhar강 유역에 위치한 2개 강우관측소의 시강우자료를 사용하였다. 기상관측소에서 관측한 정보를 분석한 결과 최근(2006~2007년)의 자료가 다른 년도에 비해 비교적 결측값이 적어 이 기간에 대한 관측소별 관측값을 비교·분석하였다. Fig. 3은 대상지 내에 위치한 2개소 기상관측소의 일 단위 관측우량을 비교한 것으로 두 관측소의 관측우량이 서로 매우 상이한 형태로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 Domel의 경우 추정결과 해발고도 800m 이하에 위치하고 있지만, Naran의 경우에는 약 2,000m 이상에 위치하고 있어 두 관측소 사이의 고도차가 매우 크기 때문인 것으로 판단된다. 두 관측소에서 1년간의 누적강우량은 Naran의 경우 2,110.8mm이고 Domel의 경우 1,457.6mm로 Naran의 연누적 강수량은 Domel에 비해 약 145% 정도 크게 나타나고 있다. 본 연구에서는 두 관측소의 강우정보를 보간기법(역

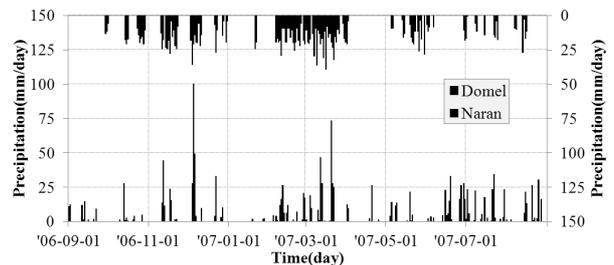


Fig. 3. Comparison of Observed Rainfall (2006.9~2007.8)

거리가중법, IDW)을 이용하여 전체유역에 강우를 분포시켜 사용하였다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i R_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad W_i = \frac{1}{L_i^2} \quad (11)$$

여기서 r은 격자 점에서의 강우량, N은 대상관측소수, W_i 는 관측소 i의 거리에 의한 가중계수, R_i 는 관측소 i의 관측강우량, L_i 는 산정할 점으로부터 관측소까지의 거리이다.

이를 위해 관측소의 위치정보(X, Y, Z)가 필요하게 되며 두 관측소와 대상 격자의 상대거리 및 표고차를 고려하여 산정하게 된다. 유역유출을 위해 국제적으로 추천되고 있는 우량관측소의 밀도는 1개소 당 약 200km로서 한국의 경우는 144km, 일본의 경우는 56km이지만 본 연구대상지인 파키스탄 Kunhar유역의 경우에는 약 1,100km에 달하고 있어 유역면적에 비해 매우 부족한 상황이며 이로 인해 유역에 발생한 강수의 정확한 공간분포가 어렵게 되고 유출량 정확도에 영향을 미치게 된다. 산정된 격자 강우량은 ASCII 포맷의 형식으로 변환하여 분포형모형의 입력인자로 사용하였다.

증발산 및 융적설을 고려하기 위해서는 유역 내 강우정보 뿐만 아니라 기상정보(기온, 상대습도, 풍속, 일조시간)가 필요하다. 기온은 관측소의 해발고도 정보를 이용하여 유역의 다양한 표고에 대해 재산정 하고, 나머지 정보에 대해서는 유역 전체에 동일한 값으로 가정하게 된다. 본 연구대상유역의 연간 유출특성은 주로 높은 고도에 위치한 지역에 존재하는 적설이 기온상승에 의해 융설되는 형태를 나타내기 때문에 융적설에 가장 큰 인자인 기온이 되게 된다. 기온은 해발고도가 높아질수록 일정한 기온감률에 의해 낮아지게 된다. 본 연구대상지의 경우에는 해발고도가 3,000m 이상의 지대가 매우 넓게 분포하고 있고, 통상 해발고도 3,000m 이상의 경우 대기상태가 건조한 상태로 분포되기 쉽다. 따라서 본 연구에서는 그림 Figs. 4 and 5에 나타나 있는 것과 같이 건조와 습윤 기온감률의 중간 수준으로 변수를 조정하여 적용하였다. 새로 조정된 기온감률 식은 아래와 같다.

$$|\Gamma| = 0.011 + 0.004 \cos \{0.0172(i - 20)\} \quad (12)$$

Eq. (12)를 이용하여 Domel 지역의 일평균기온을 기준으로 Naran 관측소의 해발고도에 대한 기온을 재산정한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Domel 관측소의 관측기온을 활용하여 재 산정된 기온을 Naran 관측소에서 관측한 기온과 비교한 결과 2007년 5월과 6월 사이에서는 실제 관측한 기온에 비해 낮게 산정되고 있지만 전체적으로 유사한 형태로 나타나고 있음을 알 수 있다.

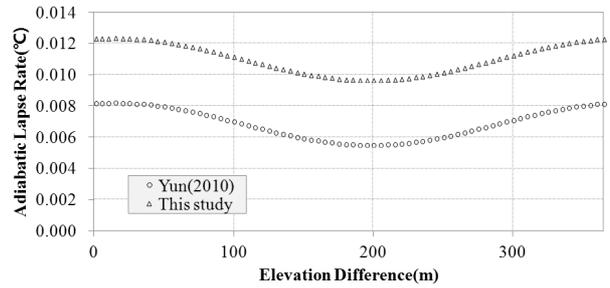


Fig. 4. Recalculated Temperature Lapse Rate

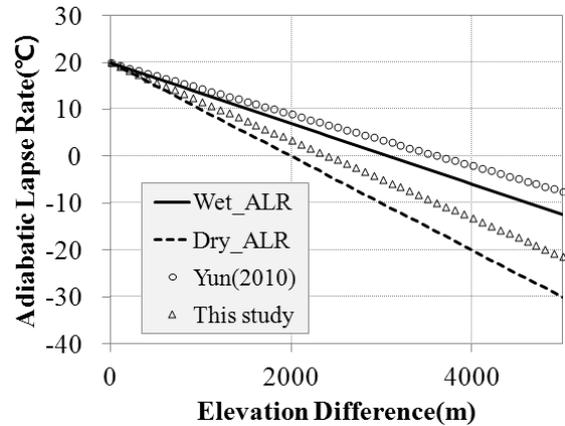


Fig. 5. Temperature Change According to Altitude

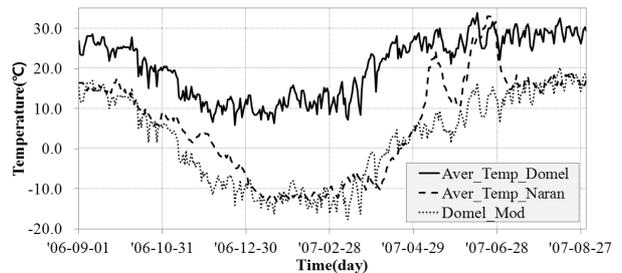


Fig. 6. Comparison Between Yearly Observed and Temperature at Naran

3.3 GIS수문매개변수 구축

K-DRUM을 이용한 유출분석을 위해서는 입력 자료로 기상정보 및 강우정보 뿐만 아니라 유역의 수문특성을 결정할 수 있는 공간적 유역특성 정보가 필요하다. 유역의 수문학적인 특성은 지형, 토지피복, 토양 등에 의해 크게 좌우된다. 세부적으로 유역의 표고분포도, 흐름방향도, 사면경사도, 토지피복도, 토양종류도 등이 있으며 이러한 자료는 GIS 형태의 정보를 가공하여 생성할 수 있다. 전국적으로 DEM이 구축되어 쉽게 입수가 가능한 우리나라와는 달리 파키스탄과 같은 제 3세계 국가에 대한 DEM자료 수집부터 관련한 문제가 발생하였다. USGS에서 제공하고 있는 인터넷 사이

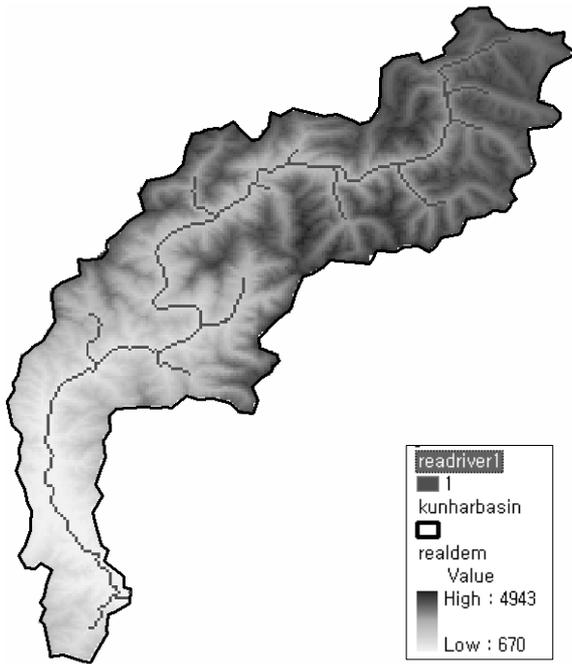


Fig. 7. Extraction of Watershed Boundary and Stream in Kunhar River Basin

트(<http://srtm.csi.cgiar.org>)를 통하여 100m 격자해상도를 가진 해당유역 내 2개 영역범위의 DEM을 입수하여 ArcGIS를 이용하여 하나의 DEM영역범위로 합친 후, 다시 Kunhar River유역의 좌표 위치를 확인하여 1개로 결합된 격자 DEM영역을 생성하여 투영 및 좌표변환 등의 전처리 과정을 거친 후 Fig. 7과 같이 유역경계선 및 하천선을 추출하였다. 또한, K-DRUM의 입력 매개변수로 표고 분포도, 흐름방향도, 사면경사도(Fig. 8) 등의 공간분포형 지형특성 값을 ASCII포맷으로 생성하였다. 흐름방향도는 HEC-GeoHMS

extention을 사용하여 유도하였으며, 유역경계선의 셀값을 유역내 수정한 최대표고값보다 더 높여서 수문학적인 DEM을 생성하였고, 하천의 흐름이 유역경계선 밖을 벗어나지 않도록 하여 유역경계 및 하천망을 원활하게 추출하는 기법(Charleux-Demarge and Peuch, 2000)을 적용하였다. Flow direction의 범례 숫자는 흐름 방향(1: ←, 2: ↖, 4: ↑, 16: →, 32: ↘, 64: ↓, 128: ↙) 을 나타낸다.

조도계수에 영향을 미치는 토지피복도와 침투계수에 영향을 미치는 토양도는 미국 FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) 홈페이지에서 자료를 입수하여 검토한 결과 해상도가 수치표고분포도에 비해 매우 낮은 관계로 개략적인 Default값을 적용하였다. 보통 유역 유출은 지형특성에 주로 영향을 받게 되지만, 보다 정밀한 유출량 산정을 위해서는 해당 유역에 대한 보다 정밀한 토지피복 및 토양특성 정보를 입력하여 사용하는 것이 좋다.

4. 적용 및 결과

본 연구에서 사용한 강우사상은 비교적 신뢰할만한 자료를 보유하고 있는 2006년부터 2007년까지 1년간 용·적설을 고려한 장기 유출량을 산정하였다. 격자간격은 500m로 설정하였으며, 이는 과거 국내 연구사례를 근거로 대상유역의 지형특성을 최대한 반영 하면서 계산시간을 절약할 수 있는 수준으로 판단되었다. 유역에 대한 총 계산 격자수는 총 14,221개로 가로 201개, 세로 240개의 격자로 구성되어 있다. 유출분석을 수행하기 위해서는 우선 대상기간 동안의 관측 강수를 강우 또는 적설의 형태로 변환하는 전처리가 필요하다. 이를 위해 용·적설 산정식을 이용하여 각 격자점에서의 강수와 기상정보에 따라 각각 산정하게 되며 산정된 결과를 유역

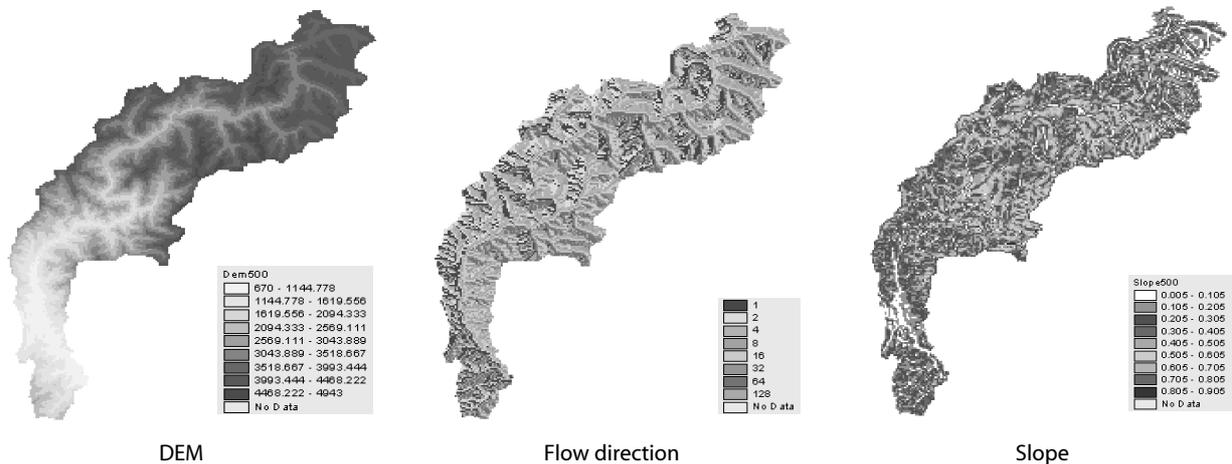


Fig. 8. Topographic Characteristics Using DEM

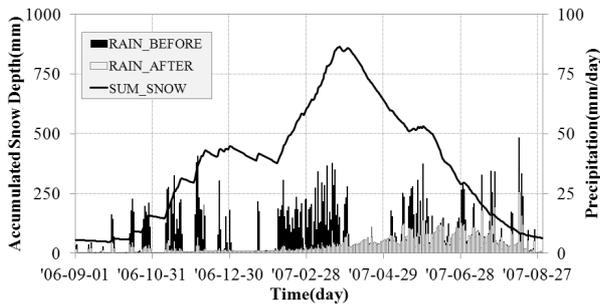


Fig. 9. Accumulated Snow Depth (m) and Converted Rainfall (mm/day)

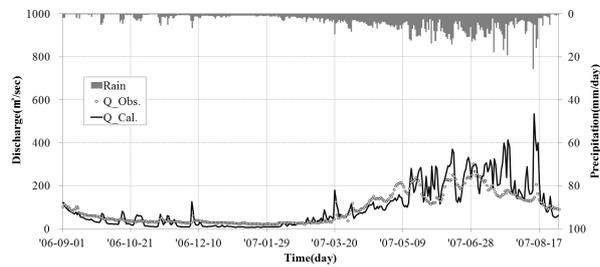


Fig. 10. Calculated and Observed Hydrograph

전체에 대해 평균하여 Fig. 9에 나타내었다. 변환하기 전의 강수는 기간에 따라 큰 폭으로 변화하고 있으나 변환된 이후의 강수는 기온이 낮은 기간 동안에는 적설의 형태로 존재하여 유출이 되지 않게 되며, 기온이 상승함에 따라 서서히 용설되어 유출에 기여할 수 있게 된다.

변환된 강수를 이용하여 연간 유출량을 산정하고 관측유출량과 비교를 한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 현재 유역 내 가용할 수 있는 2개 관측소를 활용하여 해발고도 4,000m 차이의 융·적설 특성을 반영한 유출량 모의 결과는 관측값에 비해 변동 폭이 크게 나타나고 있으며 기간에 따라서는 유출량 차이가 약 300CMS 까지 나타나고 있지만, 전체적인 경향은 비교적 유사하게 나타나고 있다. 특히 초기의 유출량 재현성은 양호하게 모의되었으며, 연중 유출패턴은 여름철 기온상승에 의해 용설로 인한 유출이 강하게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 고도가 높고 해발고도 차이가 큰 지형특성을 가진 파키스탄 Kunhar강 유역을 대상으로 GIS 공간 수문자료를 입력 자료로 활용하는 물리적기반의 분포형 강우유출모형인 K-DRUM을 고도분포에 따른 기온변화와 융·적설 모의가 가능하도록 확장 개발 하여 융·적설을 고려한 장기 유출량 모의결과를 비교 분석하였다.

본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) USGS에서 제공하고 있는 웹사이트를 통하여 100m 격자해상도를 가진 DEM을 입수하여 ArcGIS를 이용하여 투영 및 좌표변환 등의 전처리를 거쳐 하천선 및 유역경계선을 추출하였으며, K-DRUM모형의 지형 매개변수인 표고, 흐름방향도, 하천셀, 하천경사도 등을 ASCII포맷으로 생성하여 모형의 입력 자료로 구축하였다.
- (2) 해발고도 차이가 4,000m 이상이 되는 유역을 대상으로 개념적 용설모형을 사용하여 기온감률 및 고도분포에 따른 공간적 융·적설 모의를 수행하였으며 연중 유출패턴은 여름철 기온상승에 의해 용설로 인한 유출이 지배적으로 나타나는 경향성을 비교적 양호하게 재현할 수 있었다.
- (3) 현재 가용할 수 있는 강우 및 기상관측 정보는 연도별 누락 값이 다수 존재하므로 향후 강우 및 기상관측소의 증설을 통한 신뢰할만한 강우 및 기상자료가 추가 입수된다면 유출량의 신뢰도를 보다 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다. 또한 유역에 대한 보다 정확한 토양특성 및 토지피복 정보 획득으로 보다 재현성 높은 유출 모의가 가능할 것으로 기대된다.

References

- Bae, D. H. (1998). "A fundamental study on the snowmelt effects for long-term runoff analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 31, No. 6, pp. 833-844 (in Korean).
- Beven, K. (1979). "On the generalized kinematic routing method." *Water Resources Research*, Vol. 15, pp. 1238-1242.
- Charleux-Demargne, J. and Puech, C. (2000). "Quality assessment for drainage networks and watershed boundaries extraction from a Digital Elevation Model(DEM)." *Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems in Washington D.C.*, November 10-11, pp. 89-94.
- Chung, S. Y., Park, J. H., Hur, Y. T. and Jung, K. S. (2010). "The parallelization effectiveness analysis of K-DRUM model." *Journal of the Korean Society for GeoSpatial Information System*, The Korean Society for GeoSpatial Information System, Vol. 18, No. 4, pp. 21-30 (in Korean).
- Kim, N. W., Lee, B. J. and Lee, J. E. (2006). "An evaluation of snowmelt effects using swat in chungju dam basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 39, No. 10, pp. 833-844 (in Korean).
- Kim, S. J. (1998). "Grid-based kinematic wave STOrmrRunoff model (KIMSTORM)(I)." *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 31, No. 3, pp. 303-308 (in Korean).
- Lee, S. H., An, T. J., Yun, B. M. and Shim, M. P. (2003). "A tank model application to Soyanggang dam and Chungju dam with snow accumulation and snow melt." *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol.

- 36, No. 5, pp. 851-861 (in Korean).
- Morris, E. M. (1985). *Hydrological forecasting*, Chap. 7. Edited by M.G. Anderson and T.P. Burt, John Wiley&Sons, pp. 153-182.
- No, J. U., Park, J. H., Sin, J. G. and Park, W. C. (2012). "Research status of hydro power business and sediment attenuation in pakistan patirind." *Magazine of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 45, No. 9, pp. 15-20 (in Korean).
- Park, I. H., Park, J. H. and Hur, Y. T. (2011). "Flood runoff analysis of multi-purpose dam watersheds in the han river basin using a grid-based rainfall-runoff model." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Korean Society on Water Environment, Vol. 27, No. 5, pp. 587-596 (in Korean).
- Park, J. H. and Hur, Y. T. (2008a). "Water engineering : Analysis of runoff sensitivity for initial soil condition in distributed model." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers B*, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 28, No. 4, pp. 375-381 (in Korean).
- Park, J. H. and Hur, Y. T. (2008b). "Development of kinematic wave-based distributed model for flood discharge analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 41, No. 5, pp. 455-462 (in Korean).
- Park, J. H. and Hur, Y. T. (2009). "Flood runoff simulation using physical based distributed model for imjin-river basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 42, No. 1, pp. 51-60 (in Korean).
- Park, J. H. and Hur, Y. T. (2010). "Application of flood discharge for gungang watershed using GIS-based K-DRUM." *Journal of the Korean Society for GeoSpatial Information System*, The Korean Society for GeoSpatial Information System, Vol. 18, No. 1, pp. 11-20 (in Korean).
- Park, J. H. and Kang, B. S. (2006). "Comparison of runoff analysis between GIS-based distributed model and lumped model for flood forecast of dam watershed." *Journal of The Koran Association of Geographic Information Studies*, The Koran Association of Geographic Information Studies, Vol. 9, No. 3, pp. 171-182 (in Korean).
- Sugawara, M., Watanabe, I. Ozaki, E. and Katsuyama. (1984). "Tank model with snow somponent." National Research Center for Disaster Prevention, No. 65, Japan.
- Yun, J. I., Choi, J. Y., Yoon, Y. K. and Chung, U. R. (2000). "A spatial interpolation model for daily minimum temperature over mountainous regions." *Journal of The Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology*, The Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 2, No.4, pp. 175-182 (in Korean).
- Zuzel, J. F. and Cox, L. M. (1975). "Relative importance of meteorological variables in snowmelt." *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 174-176.