

# 융설유출 모형에 관한 연구

## A Study on Snowmelt Runoff Model

배 덕 효\*, 오 재 호\*\*

### 1. 서 론

우리나라의 경우 이른 봄 쌓여 있던 눈이 녹아 하천유량에 미치는 영향은 연유출량의 극소량에 불과할 것임으로 융설에 관한 연구는 상대적으로 덜 중요하게 보일지 모른다. 그러나 수자원의 계획, 갈수량 분석 및 가뭄 연구 등 여러 가지 이수 및 치수 목적으로 이용될 수 있는 수년 혹은 수십년의 장기간에 걸친 연속적인 유출해석을 하기 위해서는 융설에 관한 연구가 필수적이다. 왜냐하면 우리나라와 같이 겨울철에 눈이 내리는 사계절의 변화가 뚜렷한 지역에서 하천 유량을 장기간에 걸쳐 연속적으로 모의하기 위해서는 강수, 증발산, 침투, 토양수분의 변화 등 하천 유량에 영향을 미칠 수 있는 수문순환의 각 성분과정이 강우-유출모형에 포함되어야 할 뿐 만이 아니라 융설의 현상을 모의할 수 있는 모형의 요소가 요구되기 때문이다.

강우는 지표면에 도달하자마자 일부는 지하로 침투하여 지하수를 형성하고 나머지는 지표유출을 하여 하천의 유출량에 바로 영향을 미치지만, 강설은 지표면에 쌓여 있다가 대기의 온도가 영상으로 상승함에 따라 서서히 녹아 하천 유출량에 영향을 미친다. 그러나 아직 국내에서는 융설 모형에 대한 필요성은 인식하면서도 융설량에 관한 자료의 부족 등 여러 가지 이유로 연구가 전무한 실정이다.

본 연구에서는 일년 이상 장기간의 연속적인 유출 해석이 가능하도록 융설 모형을 도입하여 우리나라 북부 산간지방의 융설유출의 영향을 고찰하고자 한다.

### 2. 융설-유출 모형

#### 2.1 융설 모형

융설현상을 규명하기 위해서 융설모형을 사용하고자 할 때, 모형의 선정 기준은 모형의 사용목적, 결과의 정확성, 모형의 간결성, 입력자료의 가용성 및 사용의 용이성 등을 고려되어야 하므로 본 연구에서는 융설의 물리적 과정을 표현하면서도 모형의 입력자료가 비교적 간단한 개념적 융설 모형인 미국 국립기상청의 온도 지수 융설모형(temperature index snowmelt model)을 사용하였으며, 기본 개념은 다음과 같다.

물과 공기의 고체, 액체, 기체 등 3 상태의 혼합물로 생각할 수 있는 눈이 지표면에 쌓여 있는 것을 적설(snow cover, snowpack)이라 하며, 이는 기상 및 지리적 조건에 따라 계속해서 변화한다. 즉 그림 1에서와 같이 지표면에 쌓여 있는 눈은 대기로부터 태양의 복사열에 의해 고체 상태에서 액체 상태의 물로 변하게 되므로 적설 내부에서는 열의 유출입에 따라 융설의 정도가 끊임없이 변하게 된다. 특정 시간에서 지표면에 쌓여 있는 눈은 고체 상태의 눈과 액체 상태의 물로 구성되어 있다고 생각할 수 있다. 여기서 고체 상태의

\* 창원대학교 토목공학과, 조교수

\*\* 기상연구소 예보연구실, 실장

눈을 녹여 환산한 물의 양을 적설물당량(snow-water equivalent,  $w_s$ ), 액체 상태의 물의 양을 액체물당량(liquid-water equivalent,  $w_l$ )이라 한다.  $w_s$ 는 눈이 새로 오거나 용설에 의해서 변하며,  $w_l$  역시 용설에 의해 변한다. 또한  $w_{ns}$ 는 음의 열저류고(negative heat storage)를 나타내며, 이는 용설이 시작되는 한계 에너지(threshold energy) 개념이다.  $w_{ns}$ 는 새로운 눈이 오거나 또는 공기와 눈 표면의 온도 차이로 인해 열 손실이 발생하면  $w_{ns}$ 는 증가하게 되고, 반면 적설이 열을 흡수하게 되면  $w_{ns}$ 는 감소하게 된다. 만약 온도가 32 °F보다 높게 되면 눈속의 공극은 장력(tension force)과 모관력(capillary force)에 의해 적설이 보유할 수 있는 최대 액체 물의 양에 해당하는 최대 액체 수능(liquid-water holding capacity,  $w_l^0$ )이 될 때까지 물을 보유하고 있게 되나 그 범위를 넘게 되면 중력에 의해 유출되기 시작한다.

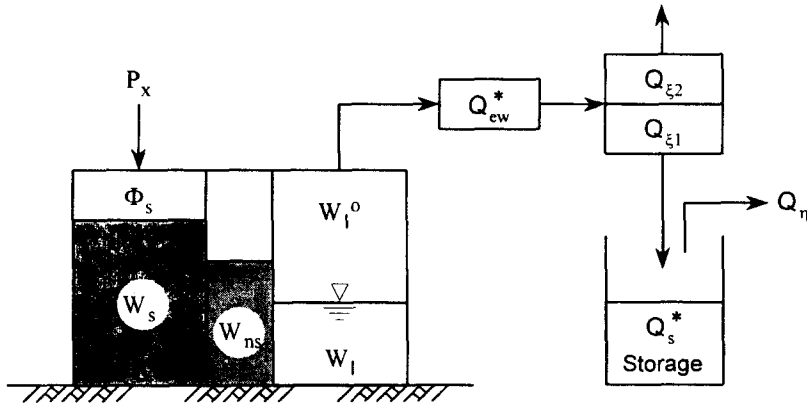


그림 1. 적설(snowpack)로부터 용설 발생의 개념도

Anderson(1973)은 강우시에는 구름이 덮혀 있으므로 태양의 복사열은 0, 눈표면에 입사하는 장파 복사열은 주변 온도에서의 흑체 복사열(blackbody radiation)과 동일, 눈표면의 온도는 32 °F, 이슬점 온도는 주위 공기 온도와 동일, 및 강우의 온도 역시 주위의 온도와 동일하다는 가정하에서 지표면에 쌓여 있는 눈의 열변화를 다음 식 (1)과 같이 표현하였다.

$$\Delta E = E_n + E_e + E_h + E_p \quad (1)$$

여기서  $E_n$ 은 순복사열,  $E_e$ 는 잠열(latent heat),  $E_h$ 는 현열(sensible heat),  $E_p$ 는 강우로부터 눈표면으로 전달되는 열전달을 나타내며, 각각 다음 식 (2)~(5)로 표현된다.

$$E_n = 0.007(T_f - 32) \quad (2)$$

$$E_e = 8.5 f(\hat{u})(e_s - 0.18) \quad (3)$$

$$E_h = 7.5 \gamma f(\hat{u})(T_f - T_{sf}) \quad (4)$$

$$E_p = C_p P_X (T_f - T_{sf}) \quad (5)$$

여기서  $T_f$ 는 주변 공기의 온도(°F),  $e_s$ 는 공기의 증기압,  $f(\hat{u})$ 는 inch/inch Hg/6 hr의 단위를 갖는 풍속의 함수를 나타낸다. 또한  $\gamma$ 는 습도계 계수(psychrometer constant),  $T_{sf}$ 는 눈표면에서의 온도,  $C_p$ 는 물의 비열(specific heat),  $P_X$ 는 강우량을 나타낸다. 따라서 강우시 용설량은 다음 식으로 표현될 수가 있다.

$$\begin{aligned} \phi_{sr} = & 0.007 (T_f - T_{sf}) + 8.5 \hat{f}(\hat{u}) (e_s - 0.18) \\ & + 7.5 \gamma \hat{f}(\hat{u}) (T_f - T_{sf}) + 0.007 P_x (T_f - T_{sf}) \end{aligned} \quad (6)$$

비강우시의 융설은 공기의 온도와 적설의 기저온도(base temperature of snowpack)의 선형 함수로 가정하여 다음 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\phi_{sd} = M_f (T_f - T_b) \quad (7)$$

여기서  $T_b$ 는 융설 여부를 결정하는 기저 온도(base temperature),  $M_f$  (inch/°F/6hr)는 융해 계수로서 온도, 풍속, 피복조건, 지역의 경사 등 기상 및 지형 조건에 따라 다르다.

토양과 눈이 접촉해 있는 면에서 발생하는 열변환은 다음 식으로 표현된다.

$$\phi_{ss} = -K_s \frac{dT}{dz} \quad (8)$$

여기서  $K_s$ 는 토양의 열전도도(thermal conductivity),  $dT/dz$ 는 토양에서 눈으로의 온도변화율을 나타낸다. 일반적으로 기상조건에 따라 달라지는 지표면과 눈 사이의 열전도는 공기와 눈이 접하는 눈표면의 열전도에 비해 매우 작아 특정 상수값( $Q_{gm}$ )을 갖는 것으로 가정된다. 적설량이 많고 매우 추운 겨울이 긴 지역에서는 0.01 in/day, 우리나라와 같이 겨울철의 온도가 대부분 0°F 이상인 지역은 0.02 in/day를 사용한다.

한편 지표면에 쌓여 있는 눈은 대기의 온도가 32 °F 보다 낮아지게 될 경우 눈은 녹지는 않으나, 공기와 적설 사이의 온도변화율에 따라 열은 변하게 된다. Anderson(1973)은 적설에서의 열변환 관계를 다음 식과 같이 제시하고 있다.

$$\Delta H^{t+1} = NM_f (T_f^{t+1} - ATI^t) \quad (9a)$$

$$ATI^{t+1} = ATI^t + \kappa (T_f^{t+1} - ATI^t) \quad (9b)$$

여기서 ATI는 눈표면의 선행온도지수(antecedent temperature index),  $\kappa$ 는 적설의 두께와 관련된 선행온도지수의 매개변수로서 0과 1 사이의 값을 갖는다.  $\kappa$  값이 0.1보다 작다는 것은 과거 몇 주 동안의 온도가 중요한 역할을 함을 의미하고,  $\kappa$  값이 0.5보다 크면 단지 과거 몇일 동안의 온도가 영향을 미침을 의미한다.

이와 같이 지표면에 쌓여 있는 눈은 대기의 온도가 32 °F 보다 큰 경우와 작은 경우, 강우시와 비강우시 모두 열의 유출입이 발생한다. 즉 눈표면이 녹아 액체 물당량(liquid water storage)이나 융설 유출을 변화시키려면 음의 열 저류고가 0이 되도록 열이 공급되어야 한다. 따라서 적설로부터 유출되는 초과수(excess water)의 양( $Q_{ew}^*$ )은 다음 식 (10)으로 표현될 수 있다.

$$Q_{ew}^* = P_x + \phi_s - w_l^o - w_{ns} \quad (10)$$

여기서  $P_x$ 는 강수량,  $\phi_s$ 는 공기와 눈이 접해 있는 눈표면과 토양과 눈의 접촉면으로부터 야기되는 융설총량,  $w_l^o$ 는 액체 수능(liquid water holding capacity)을 나타낸다.

한편 적설의 지역적 분포는 전체적인 적설량을 파악하는데 매우 중요하다. 적설의 지역분포 감소는 강설 잔류량, 식생 및 공기의 온도 등의 영향을 받으므로 각 지역 고유의 적설의 지역분포 감소곡선을 갖는다. 이와 같은 적설면적 감소곡선을 결정하는 방법은 융설기간 동안의 항공사진을 이용하는 방법 등 몇몇 방법이 있지만, 이와 같은 곡선을 결정하기 위한 자료가 존재하지 않는 지역에서는 다음과 같이 Anderson(1973)이 제안한 곡선을 사용할 수 있다.

$$S_c = 3.61 R_{wi}^5 - 7.06 R_{wi}^4 + 5.23 R_{wi}^3 - 1.41 R_{wi}^2 + 0.66 R_{wi} - 0.03 \quad \text{if } w_l \leq w_{ln} \quad (11)$$

$$S_c = S_{cd} + \frac{1 - S_{cd}}{w_{ln} - w_{ln}} (w_s - w_{ln}) \quad \text{if } w_l > w_{ln}$$

여기서 만약  $\delta_s$ 를 강설이 시작된 이후의 최대 물당량(maximum water equivalent)과 항상 눈이 100% 덮혀 있는 상태가 되는 유역 평균 물당량(mean areal water equivalent)  $w_{ln}$  가운데 적은 값을 나타낸다고 하면,  $R_{wi}$ 는 유역 평균 물당량과 지수 값  $\delta_s$ 의 비율을 나타낸다. 식 (11)로부터 계산된  $S_c$ 는 융설, 음의 열저류(negative heat storage) 계산시 보정 계수로 사용된다.

지표에 쌓여 있는 눈에서 융해수(meltwater)가 막 생기기 시작하는 단계를 적설의 'ripe' 라 하는데, 이 상태에 도달하게 되면 경우나 융해수에 의해 유출이 발생하기 시작한다. Anderson(1973)은 Central Sierra Snow Laboratory에서 lysimeter를 이용한 실험결과로부터 초과 액체수(excess liquid-water)는 먼저 지체된 연후에 감소된다는 사실을 발견하고, 이들 자료를 이용하여 적설의 지체시간  $\xi$  (hrs)와 유출량  $Q_\gamma$  (in/6 hr)에 대한 다음 식 (12), (13)를 제시하였다.

$$\xi = 5.33 \left[ 1 - \exp \left( -0.03 \frac{w_l}{Q_{ew}^*} \right) \right] \quad (12)$$

$$Q_\gamma = \frac{Q_s^* + Q_{\xi 1}}{1.0 + 0.5 \exp \left( -83.5 \frac{Q_{\xi 1}}{w_l^{1.3}} \right)} \quad (13)$$

여기서  $Q_s^*$ 는 저류고의 초과 액체수량(excess liquid-water)(in/6hr),  $Q_{\xi 1}$ 은 현재 시간의 지체된 유입량을 나타낸다.

## 2.2 유출 모형

이와 같은 융설모형은 Sacramento 모형과 결합되어 유출해석을 할 수 있다. 이 모형의 특징 가운데 하나는 모형이 요구하는 입력 자료가 비교적 손쉽게 구할 수 있는 강수량, 증발량 및 대기온도 뿐이라는 것이다. 지표면에 눈이 없는 상태에서 단지 강수량(rainfall)이 입력되면 융설모형은 계산을 수행하지 않지만, 시간이 진행됨에 따라 새로운 눈이 오거나 지표면에 눈이 쌓여 있는 상태에서는 융설 모형에서 적설의 열수지 및 물수지를 산정하게 되고 그 결과 초과 융해수의 양이 산정된다. 이 계산치는 Sacramento 모형의 입력치가 되어 유출량을 계산하게 된다. Sacramento 모형은 이미 국내에서도 적용되어 배덕효와 조원철(1995), 신용노(1996), 심순보 등(1996), 이상호 등(1997) 등에 의해 모형의 유용성이 검증된 바 있다.

## 3. 융설 및 유출 해석

모형의 적용 대상유역은 소양강 제 1 지류인 내린천 유역이다. 유역의 출구점은 인제군 인제읍 고사리에 위치한 내린천 수위표 지점이며, 유역면적은 1,059.6 km<sup>2</sup>이다. 내린천은 V형 하천단면을 가지고 있으며, 하폭은 130m, 하상구배는 약 1/240이다(한국수자원공사, 1996).

본 연구에 필요한 수문자료로는 모형의 입력자료로 요구되는 강수량, 잠재 증발량, 대기온도 자료 및 모형의 계산 및 검증을 위한 유출량 자료이며, 모형의 계산 및 검증에 이용된 기간은 1990년 1월 1일~1996년 12월 31일의 7년간의 일자료이다. 소양강 댐 상류 유역에는 수자원공사에서 운영하는 12개의 자기 우량 관측소(T/M)이 있으나, 대부분의 경우 동절기인 11월에서 다음해 3월까지는 운영되지 않고 있는 실정이므로 본

연구에서는 내린천 유역의 유역 평균 강수량을 산정하기 위해서 수자원공사의 창촌, 방동, 상남, 현리, 귀둔, 군량, 인제 자기 우량 관측소 자료 이외에도 건설교통부의 명개, 추대 관측소의 강수량 자료를 이용하여 산술 평균법으로 산정하였다. 대기의 일 최대, 최소 온도 및 증발접시에 의한 잠재 증발산 자료는 인제 측후소의 자료를 이용하였다. 또한 유역의 출구점에 해당하는 내린천 수위표 지점의 관측 수위를 유량으로 환산하기 위해서 수위-유량 관계곡선식을 사용하였으며, '96년 식  $Q = 122.393118 (H - 0.463)^{1.446412}$ ;  $H \geq 0.463$  (한국수자원공사, 1996)을 이용하였다. 전체 7년의 일 자료 가운데 1993년~1996년의 4년 자료는 모형의 매개변수 산정에 이용되었으며, 1990년~1992년의 3년 자료는 모형의 검증에 사용하였다.

본 연구에 사용된 모형의 매개변수에는 Sacramento 모형에 14개, kinematic-type의 하도홍수추적모형의 특성을 가진 개념적 비선형 저수지 모형에 2개 및 융설모형에 12개 등 총 28개의 매개변수가 있다. 표 1은 융설 모형에 포함된 매개변수 및 정의를 나타낸다. 모형의 매개변수 추정은 수동보정법(manual estimation)과 자동추적법(automatic estimation)을 이용하였다.

그림 2은 내린천 수위표 지점을 유역 출구로 하는 내린천 유역에서의 모형의 적용성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 모형에 의한 계산 유량은 관측 유량과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 3은 1990년 1월 1일부터 3개월 동안의 융설 모형을 구성하고 있는 변수들의 거동 특성을 나타낸다. Anderson의 융설 모형의 기본 계산 단위는 6 시간이므로 대기의 온도는 일 최대 및 최소 온도로부터 6 시간 단위로 산정할 필요가

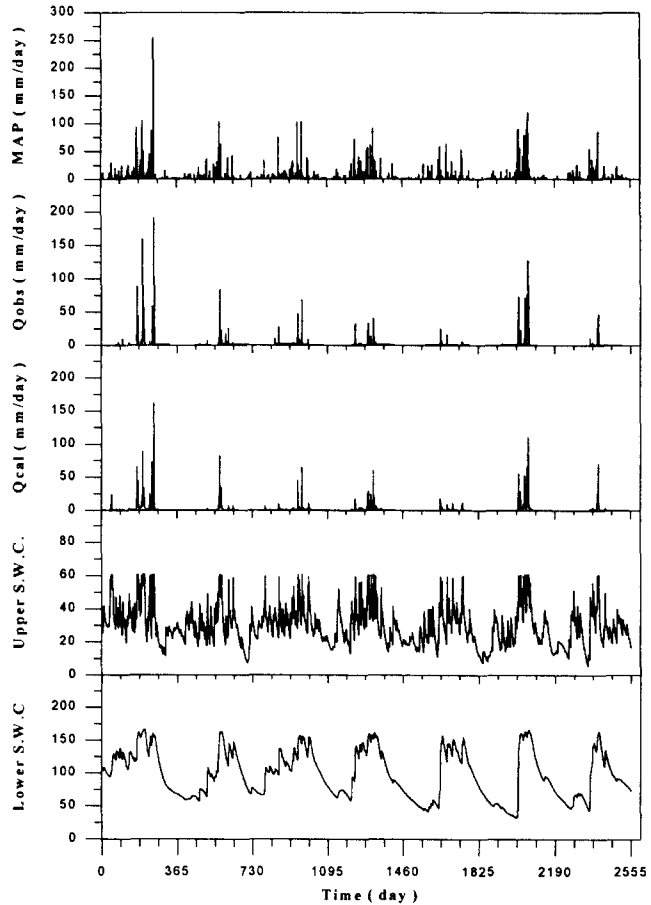


그림 2. 융설을 포함한 강수량에 따른 관측 및 계산유량, 상층부 및 하층부 토양수분의 변화(1990. 1. 1-1996. 12. 31)

표 1. 융설모형의 매개변수

기 호	정 의
$P_{su}$	눈과 강우의 구별점 온도(°F)
$\varphi_s$	우량계 강설 결손치의 보정계수
$T_b$	비강우시 융설의 기저온도(°F)
$M_{fx}$	비강우시 최대 융설계수(in/6hr/°F)
$M_{fn}$	비강우시 최소 융설계수(in/6hr/°F)
$\kappa$	선행온도지수 매개변수(0.0-1.0)
$NM_{fx}$	최대 음의 융설계수(in/6hr/°F)
$SI$	항상 100% 적설이 유지되는 유역 평균 물당량(in)
$R_{hc}$	액체수능(liquid-water holding capacity)의 %
$Q_{gm}$	일일 토양면 융설량
$W_6$	강우시 6시간 평균 풍속
$R_{ae}$	100% 강설피복하에서 증발산이 발생하는 면적비 (%)

있다(Anderson, 1973). 그림에 나타난 대기 온도는 일 평균 기온( $^{\circ}\text{C}$ )를 도시한 것이다. 즉 용설 모형은 그림 2의 강수량 자료가 입력될 때 대기의 온도가 용설 모형의 매개변수 가운데 하나인 눈과 강우의 구별점 온도  $P_{sw}$  (통상  $33^{\circ}\text{F}$ ) 보다 작으면 눈으로 간주되고 이 보다 크면 비로 간주한다. 일단 지표면에 눈이 쌓이게 되면 온도 변화에 따라 적설 몰당량( $w_s$ ), 액체 몰당량( $w_l$ ), 음의 열 저류고( $w_{ns}$ )가 변화하게 된다.

#### 4. 결론

일반적으로 용설은 지표에 쌓여 있는 강설량이 물로 전환되는 물리적 과정을 말한다. 본 연구에서는 우리나라 북부 산간 지방의 동절기 용설의 영향이 토양수분 및 유출에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 용설 모형을 이용하였다. 그 결과 본 연구의 용설 모형은 이들 영향을 비교적 잘 설명할 수 있는 것으로 판단된다. 그러나 향후 동절기의 보다 정확한 토양수분의 변동 및 유출 해석을 수행하기 위해서는 보다 정확한 모형의 매개변수 추정이 되어야 하며, 이를 위해서는 강설량의 지역적 변동성과 용설량 등에 관한 관측 자료가 요구된다.

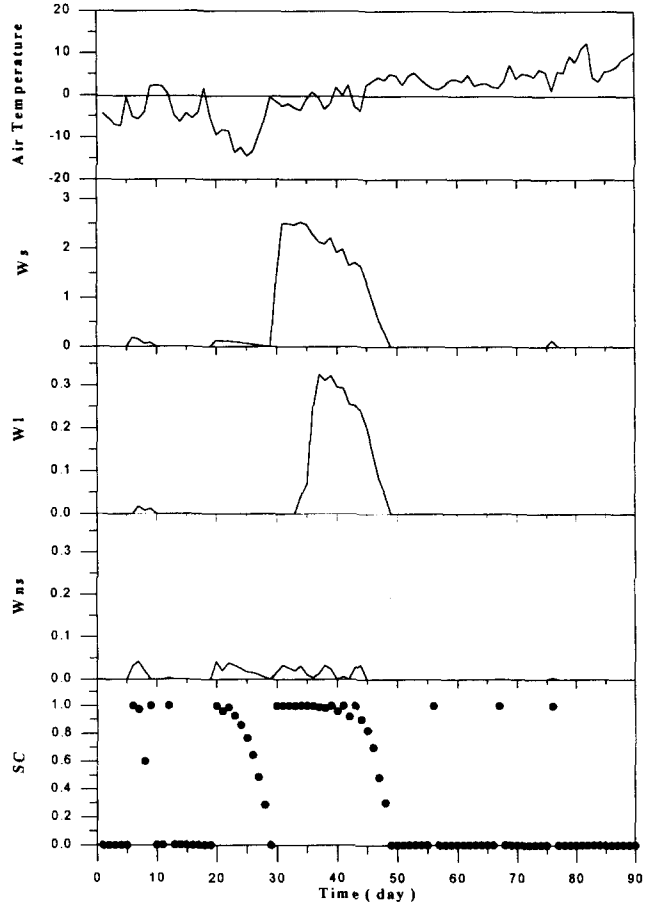


그림 3. 대기온도 변화에 따른 적설 요소의 변동 특성(1990. 1. 1-1990. 3. 31)

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 특정과제 약기상 감시 예측 및 재해 대응 기술 개발(PD-01-01-01)과제의 일부로서 수행되었습니다. 자료수집에 도움을 주신 수자원연구소 신용노 연구원에게 사의를 표합니다.

#### 참고문헌

- Anderson, E.A., 1973, "National Weather Service River Forecast System-Snow Accumulation and Ablation Model.", NWS-HYDRO-17, Washington D.C.
- 배덕효, 조원철, 1995, "물리적·개념적 연속 유출모형에 의한 유출해석," 한국수자원학회지, 제28권 제6호, pp. 193-202.
- 신용노, 1996, "일 유출 모형(NWS-PC)의 매개변수 산정 및 적용," 석사논문, 충남대학교 토목공학과, p. 135.
- 심순보, 박노혁, 김선구, 김주훈, 고덕구, 1996, "하천 수계의 홍수 예측을 위한 강우-유출 모형의 비교," 한국수자원학회지, 제29권 제6호, pp.237-247.
- 이상호, 김영성, 신용노, 1997, "한강수계 다목적댐 하류 일 유출 모의 연구," 한국수자원학회논문집, 제30권 제6호, pp. 575-585.