

## 장기 유출해석에서의 융설영향에 관한 기초 연구 A Fundamental Study on the Snowmelt Effects for Long-Term Runoff Analysis

배 덕 효\* / 오 재 호\*\*

Bae, Deg-Hyo / Oh, Jai-Ho

---

### Abstract

The objectives of this study are to adopt a snowmelt model for coupling a rainfall-runoff model and to study snowmelt effects for long-term runoff analysis on the northeast mountaneous area in Korea. The NWS temperature-index snowmelt model was selected and tested on the 1,059.6 km<sup>2</sup> Naerinchon basin. It can be observed that the time variations of the computed areal extents of snow cover from the model are well agreement with those of the observed station snowfall records on the Inje meteorological station. It is also evident that the computed soil water contents and river flows indicate quite different behaviors with or without snowmelt model. It is concluded that the snowmelt model works well and the snowmelt effects for multi-decadal river flow computations are important on the study area.

*Keywords:* snowmelt model, rainfall-runoff model, snowmelt effect, long-term runoff analysis

---

### 요 지

본 연구의 목적은 융설모형을 국내에 도입하고 이를 강우-유출모형과 결합하여 우리나라 북부 산간지방의 장기 유출해석을 위한 융설의 영향을 고찰하는데 있다. 선택된 모형은 미국 국립기상청의 온도지수 융설모형이며, 이를 유역면적이 1,059.6 km<sup>2</sup> 인 내린천 유역에 적용·검토했었다. 모형에 의해서 계산된 강설의 지역적 분포에 대한 시간적 변동성은 인제 측후소에서 관측된 강설량의 변동성과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한 모형에 의해서 계산된 토양수분 및 하천유량은 융설모형의 존재 유무에 따라 매우 다른 거동을 나타냄을 알 수 있었다. 따라서 본 연구의 융설모형은 국내의 상황에 적합한 것으로 생각되며, 본 연구 대상지역의 장기 유출해석시 융설의 영향은 중요한 것으로 판단된다.

**핵심용어 :** 융설 모형, 강우-유출 모형, 융설 영향, 장기 유출해석

---

\* 창원대학교 토목공학과 조교수

Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Changwon National Univ., Changwon 641-773, Korea

\*\* 기상연구소 예보연구실 실장

Director, Forecast Research Div., Meteorological Research Institute, Seoul 110-360, Korea

## 1. 서론

우리나라의 경우 이른 봄 쌓여 있던 눈이 녹아 하천 유량에 미치는 영향은 홍수기 하천유량에 비해 상대적으로 적어 용설에 관한 연구는 덜 중요하게 느껴질지 모른다. 그러나 수자원 계획, 갈수량 분석 및 가뭄 연구 등 여러 가지 이수, 치수 목적으로 이용될 수 있는 수년 혹은 수십년의 장기간에 걸친 연속적인 유출해석을 하기 위해서는 용설에 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 아니라 용설의 현상을 모의할 수 있는 모형의 요소가 요구된다. 즉 강우-유출 모형에서 일반적으로 입력치로 요구되는 강수량(precipitation)의 형태가 강우(rainfall)냐 아니면 강설(snow)이냐에 따라 유출 계산에 미치는 영향은 매우 다르기 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 미치기 때문이다.

그 동안 국내에서의 유출모형에 관한 연구는 모형의 사용 목적에 따라 주로 외국에서 개발한 모형을 국내에 적용하고 있는 실정이며, 대부분의 경우 자료의 부족 및 매개변수 추정의 문제 등으로 인하여 치수목적의 단일 홍수사상의 해석에 국한되었다. 근간에는 몇몇 수공학자들에 의해 연속적인 유출 해석이 시도되었으나 용설(snowmelt)의 영향이 없는 비동절기에 국한된 실정이었다. 아직 국내에서는 용설모형에 대한 필요성은 인식하면서도 용설량에 관한 자료의 부족 등 여러 가지 이유로 연구가 진부한 실정이다. 따라서 우리나라와 같이 사계절의 변화가 뚜렷한 지역에서 여러가지 목적으로 이용될 수 있는 수년 혹은 수십 년에 걸친 장기간의 유출 해석을 하기에는 미흡한 점이 많았다.

본 연구의 주 목적은 일년 이상에 걸친 장기간의 연속적인 유출해석이 가능하도록 용설모형을 도입하고, 이를 효율적인 유출모형과 결합한 후 유출해석을 실시하여 우리나라 북부 산간지방의 용설의 영향을 고찰하고자 한다.

## 2. 용설 모형

### 2.1 모형의 선정

용설현상을 규명하기 위해서 용설모형을 사용하고자 할 때, 모형의 선정 기준은 모형의 사용목적, 결과의 정확성, 모형의 간결성, 입력자료의 가용성 및 사용의 용이성 등을 고려하여야 한다. 지금까지 국외에서 개발된 용설모형의 종류에는 단순한 통계적 모형(예, Zuzel과 Cox, 1975; Curtis와 Schaake, 1979)에서 복잡한 분배형 모형(예, Morris, 1985; Wankiewicz, 1978)에 이르기까지 그 형태가 다양하고, 모형의 형식에 따라 요구되는 입력자료도 다르다. 모형의 형식이 용설현상의 물리적 과정을 표현할 수 있고, 입력자료가 풍부하고 정확하면 할수록 모형의 결과는 정확할 것임은 분명하나 국내에서의 용설 연구에 관한 현실을 감안하여 모형의 형식은 용설의 물리적 과정을 표현하면서도 모형의 입력자료가 비교적 간단한 총괄형(lumped) 개념적 모형(conceptual model)이 적절한 것으로 생각된다.

개념적 물리적 용설모형은 다음과 같은 3가지 유형으로 분류될 수 있다(Day, 1990). 첫째는 온도 자료로부터 경험적으로 용설요소(melt factor)를 도출한 모형, 둘째는 열변환 관계를 표현하기 위한 지수(index)를 사용한 모형, 그리고 세번째는 실제로 열수지를 고려한 모형으로 나눌 수 있다. 첫 번째 유형은 지표면에 쌓여 있는 눈의 상태를 고려할 수 있는 변수가 없는데 비해 두 번째, 세 번째 유형은 이들을 고려할 수 있는 모형이다. 첫 번째 유형에 속하는 모형은 수 없이 많은데 이들 가운데 대표적인 모형으로는 Linsley(1943), U.S. Army Corps of Engineers(1972), Sugawara 등(1984) 등이 있다. 두 번째 유형에 속하는 모형은 대부분 열변환의 지수로서 온도를 사용하는데 예를 들어 Willen 등(1971), Anderson(1973), Speers 등(1978) 등이 있다. 세 번째 유형에 속하는 모형은 복사, 가시(sensible heat) 및 잠재열 등 열수지를 계산하는데 이 유형에 속하는 모형으로는 Anderson(1976), Morris와 Godfrey(1978) 등이 있다.

본 연구에서는 국내에서의 용설 연구에 관한 현실을 감안하여 모형의 형식은 용설의 물리적 과정을 표현하면서도 모형의 입력자료가 비교적 간단한 총괄형(lumped) 개념적 모형(conceptual model)인 미국 국립기상청의 온도지수 용설모형(temperature index

snowmelt model)을 선정하고자 한다. Anderson에 의해서 개발된 이 모형은 전세계에서 가장 우수한 온도지수-용설모형(temperature index snowmelt model) 중의 하나인 것으로 알려져 있다(Bras, 1990).

## 2.2 NWS의 용설모형

Anderson(1973)에 의해 제안된 이 모형의 기본 개념은 다음과 같다. 물과 공기의 고체, 액체, 기체 등 3상태의 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 태양 복사열에 의해 고체 상태에서 액체 상태의 물로 변하게 되므로 적설 내부에서는 열의 유출입에 따라 용설의 정도가 끊임없이 변하게 된다. 특정 시간에서 지표면에 쌓여 있는 눈은 고체 상태의 눈과 액체 상태의 물로 구성되어 있다고 생각할 수 있다. 여기서 고체 상태의 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 새로운 눈이 오거나 용설에 의해서 변하며,  $w_l$  역시 용설에 의해 변한다. 또한  $w_{ms}$ 는 음의 열저류고(negative heat storage)를 나타내며, 이는 용설이 시작되는 한계 에너지(threshold energy) 개념이다.  $w_{ms}$ 는 새로운 눈이 오거나 또는 공기와 눈 표면의 온도 차이로 인해 열 손실이 발생하면  $w_{ms}$ 는 증가하게 되고, 반면 적설이 열을 흡수하게 되면  $w_{ms}$ 는 감소하게 된다. 만약 온도가 32 °F(0 °C)보다 높게되면 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)이 될 때까지 물을 보유하고

있게 되나 그 범위를 넘게 될 경우 초과수는 일정한 지체 시간이 지난 후 중력에 의해 유출되기 시작한다. 이와 같은 용설발생의 원리는 다음과 같은 열수지와 물수지에 의해 설명될 수 있다.

**적설의 열수지** : 지표면에 쌓여 있는 눈이 따뜻한 공기의 영향으로 열을 흡수하게 되면 용설이 발생한다. 이와 같은 용설 발생의 주요 에너지 원은 태양의 복사열이며, 적설의 열변화는 식 (1)과 같은 열수지 방정식으로 표현될 수 있다.

$$\Delta E = E_{sw} - E_{rs} + E_{lw} - E_{rl} - E_{le} + E_p - E_e - E_h \pm E_{as} \pm E_{ss} \quad (1)$$

여기서  $E_{sw}$ 는 단파 복사열,  $E_{rs}$ 는 반사단파 복사열,  $E_{lw}$ 는 장파 복사열,  $E_{rl}$ 은 반사장파 복사열,  $E_{le}$ 는 지표면으로부터의 장파 복사열,  $E_p$ 는 강우에 의한 이류열(advective heat),  $E_e$ 는 증발에 의한 열손실,  $E_h$ 는 대류에 의한 현열(sensible heat),  $E_{as}$ 는 공기와 눈표면에서의 전도에 의한 열변환,  $E_{ss}$ 는 눈과 토양 접촉면에서의 전도에 의한 열변환을 나타낸다. 이와 같은 열수지 방정식에 필요한 모든 자료를 전 지역에서 측정하는 것은 쉽지 않기 때문에 일반적으로 손쉽게 구할 수 있는 자료를 이용할 수 있도록 많은 경험 공식들이 제시되어 있다. Anderson(1973)의 용설 모형은 온도지수를 사용하며, 적설의 열변환은 강우시와 비강우시로 나누어 생각할 수 있다.

**강우시의 열수지** : Anderson은 강우시에는 구름이 덮혀 있으므로 태양의 복사열은 0, 눈표면에 입사하는 장파 복사열은 주변 온도에서의 흑체 복사열(blackbody radiation)과 동일, 눈표면의 온도는 32 °F(0 °C), 이슬점 온도는 주위 공기 온도와 동일, 강우의 온도 역시 주위의 온도와 동일하다는 가정하에서 식 (1)을 다음 식 (2)와 같이 간략화하였다.

$$\Delta E = E_n + E_e + E_h + E_p \quad (2)$$

여기서 순복사열  $E_n$ 은 식 (3)의 Stefan-Boltzman 법칙에 의해 계산될 수 있으며, Anderson(1973)은 눈표면에서의 온도가 32 °F라는 가정하에서 식 (4)와 같은 선형화된 방정식을 제안하였다.

$$E_n = \sigma (T_k^4 - T_{sk}^4) \quad (3)$$

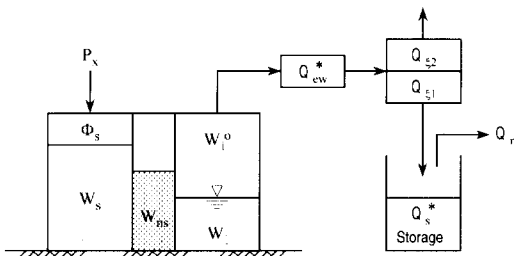


그림 1. 적설(snowpack)로부터 용설 발생의 개념도

$$E_n = 0.007(T_f - 32) \quad (4)$$

여기서  $\sigma$ 는 스테판-볼쯔만 상수( $5.67 \times 10^{-8} \text{ J}/(\text{m}^2 \text{ s } ^\circ\text{K}^4)$ ),  $T_k(^{\circ}\text{K})$  및  $T_f(^{\circ}\text{F})$ 는 주변 공기의 온도를 나타내며,  $T_{sk}(^{\circ}\text{K})$ 는 눈표면에서의 온도를 나타낸다.

한편 잠열의 변화  $E_e$ 와 밀접한 관계가 있는 증발량을 산정하는 방법은 에너지 수지법, 공기동력학적 방법, 에너지 수지 및 공기동력학적 방법의 혼합방법 등 여러 가지가 있으나, Anderson은 공기동력학적 방법을 사용하였다. 이 방법은 눈표면으로부터의 물분자의 이동은 연직방향의 증기압 구배에 비례한다는 Dalton의 법칙에 근거를 두며, 일반적인 식은 다음과 같이 표현된다.

$$E_e = L_v W_E \quad (5.a)$$

$$W_E = f(\hat{u})(e_s - e_n) \quad (5.b)$$

여기서  $L_v$ 는 잠재 증기화열,  $W_E$ 는 증발율,  $e_s$ 는 공기의 증기압,  $e_n$ 은 눈표면의 증기압,  $f(\hat{u})$ 는 inch/inch Hg/6 hr의 단위를 갖는 풍속의 함수를 나타낸다. Anderson은 잠열의 변화  $E_e$ (inch/6 hr)에 대하여 다음 식을 제안하였다.

$$E_e = 7.5 f(\hat{u})(e_s - 0.18) \quad (6.a)$$

$$f(\hat{u}) = 6.0 \times 10^{-3} \hat{u} \quad (6.b)$$

$$e_s = 8.118 \times 10^6 \exp\left[\frac{-7701.54}{T_f + 405.03}\right] \quad (6.c)$$

식 (6.b)는 Central Sierra Snow Laboratory, NOAA-ARS Cooperative Snow Research Station에서의 실험결과로서 눈이나 비가 올 때 6시간 평균 풍속함수  $f(\hat{u})$ 를 나타낸다.  $\hat{u}$ 는 눈표면으로부터 0.5 m 위의 풍속을 나타낸다. 또한 식 (6.a)의 계수 7.5는 1 인치 응축에 필요한 잠재 증기화열을 나타내므로 잠열 변화에 따른 액체 상태의 물의 총량( $E_e^*$ )은 응축에 의한 1 인치를 포함해서 다음 식 (7)과 같이 표현된다.

$$E_e^* = 8.5 f(\hat{u})(e_s - 0.18) \quad (7)$$

또한 눈표면에서 대기로 전도되는 현열( $E_h$ )는 다음 식 (8)과 같은 현열과 잠열의 비를 나타내는 Bowen비 ( $R_B$ )로 부터 구할 수 있다.

$$R_B = \frac{E_h}{E_e} = C_B p_o \frac{T_f - T_{sf}}{e_s - e_n} \quad (8)$$

여기서  $C_B$ 는 Bowen 계수( $6 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $p_o$ 는 지표면의 대기압,  $T_f$ ,  $T_{sf}$ 는 각각 대기 및 눈표면에서의 온도이다. 따라서 현열  $E_h$ 는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$E_h = 7.5 \gamma f(\hat{u})(T_f - T_{sf}) \quad (9.a)$$

$$\gamma = C_B p_o = 3.59 \times 10^{-4} p_o \text{ (inch Hg/}^{\circ}\text{F)} \quad (9.b)$$

$$p_o = 1012.4 - 11.34 z_{100} + 0.00745 z_{100}^{2.4} \quad (9.c)$$

여기서  $z_{100}$ 은 100 m 단위로 환산한 고도를 나타낸다.

마지막으로 강우로부터 눈에 전달되는 열전달은 공기와 눈표면의 온도차이의 함수로 표현되며 다음 식과 같다.

$$E_p = C_p P_X (T_f - T_{sf}) \quad (10)$$

여기서  $C_p$ 는 물의 비열(specific heat),  $P_X$ 는 강우량을 나타낸다. 따라서 강우시 융설량은 다음 식으로 표현될 수가 있다.

$$\begin{aligned} \phi_{sr} = & 0.007(T_f - T_{sf}) + 8.5 f(\hat{u})(e_s - 0.18) \\ & + 7.5 \gamma f(\hat{u})(T_f - T_{sf}) + 0.007 P_X (T_f - T_{sf}) \end{aligned} \quad (11)$$

**비강우시의 열수지** : 비강우시의 융설은 공기온도와 적설의 기저온도(base temperature of snowpack)의 선형 함수로 가정하여 다음 식 (12)과 같이 표현된다.

$$\Phi_{sd} = M_f (T_f - T_b) \quad (12.a)$$

$$M_f = \frac{M_{fx} + M_{fn}}{2} + \frac{M_{fx} - M_{fn}}{2} \sin\left(2\pi \frac{284 + D_{ju}}{366}\right) \quad (12.b)$$

여기서  $T_b$ 는 융설 여부를 결정하는 기저온도(base temperature)로서 Anderson은 초기 추정치로 32 °F가 적절함을 제안하였다.  $M_f$ (inch/°F/6hr)는 융해계수로서 온도, 풍속, 피복조건, 지역의 경사 등 기상 및 지형 조건에 따라 다르다. 일반적으로 남쪽을 향하는 사면, 피복조건이 덜한 지역, 풍속이 강한 지역이 융해계수가 큰 지역이다. 따라서 식 (12.b)와 같이 융해계수는 시간에 따라 변하는 계수를 사용할 필요가 있다.  $M_{fn}$ ,  $M_{fx}$ 는 최소 및 최대 융해계수를 나타내며, 각각 12월 21일과 6월 21일에 발생하는 것으로 가정한다.  $D_{ju}$ 는 1월 1일을 시작으로한 일자를 나타낸다. 산지 지역에 대한 전형적인 융해계수는 Bras(1990)에 잘 제시되어 있다.

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

$$\Delta H^{t+1} = NM_f(T_f^{t+1} - ATI^t) \quad (13.a)$$

$$ATI^t = ATI^{t-1} + \kappa(T_f^t - ATI^{t-1}) \quad (13.b)$$

$$NM_f = \frac{NM_{fx} + NM_{fn}}{2} + \frac{NM_{fx} - NM_{fn}}{2} \sin\left(2\pi \frac{284 + D_{ju}}{366}\right) \quad (13.c)$$

$$NM_{fn} = NM_{fx} \frac{M_{fn}}{M_{fx}} \quad (13.d)$$

여기서  $ATI$ 는 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 몇 일 동안의 온도가 영향을 미침을 의미한다. Anderson(1973)은  $\kappa$  값의 초기 추정치로 0.5가 적절함을 제시하였다. 이와 같이 선행온도지수의 결정은 식 (13.b)에 따르지만, 만약 산정된  $ATI$ 가 32 °F 보다 크면  $ATI$ 는 32 °F, 또한 6시간 동안의 강설량

이 0.2 inch(5.08 mm)보다 많으면  $ATI$ 는 눈의 온도와 동일한 것으로 간주한다. 식 (13.c)의  $NM_f$ 는 음의 융해계수(negative melting factor)를 나타내며, 이는 식 (12.b)의 융해계수와 같은 형태를 갖는다.  $NM_{fx}$ ,  $NM_{fn}$ 은 최대 및 최소 음의 융해계수를 의미한다. 식 (13.c) 및 (13.d)에서 미지수는 최대 음의 융해계수  $NM_{fx}$ 인데 이는 0.003~0.007의 범위의 값을 가지며 초기 추정치로는 0.005가 적절하다.

**지표면과 눈표면에서의 융설 :** 토양과 눈이 접촉해 있는 면에서 발생하는 열변환은 다음 식으로 표현된다 (Bras, 1990).

$$\Phi_{ss} = -K_s \frac{dT}{dz} \quad (14)$$

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(0.254 mm/day), 우리나라와 같이 겨울철의 온도가 대부분 0 °F(-17.8 °C) 이상인 지역은 0.02 in/day(0.508 mm/day)을 사용한다.

**적설의 지역적 분포 :** 적설의 지역적 분포(Areal Extent of Snow Cover)는 전체적인 적설량을 파악하는데 매우 중요하다. 적설의 지역분포 감소는 강설 잔류량, 식생 및 공기 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 곡선으로부터 유도한 다음 식을 사용할 수 있다.

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

$$S_c = S_{cd} + \frac{1 - S_{cd}}{w_{lu} - w_m} (w_s - w_m) \quad \text{if } w_l > w_m \quad (15)$$

여기서 만약  $\delta_s$ 를 강설이 시작된 이후의 최대 불당

량(maximum water equivalent)과 항상 눈이 100 % 덮혀 있는 상태가 되는 유역 평균 물당량(mean areal water equivalent)  $w_{la}$  가운데 적은 값을 나타낸다고 하면,  $R_{wi}$ 는 유역 평균 물당량과 지수 값  $\delta_s$ 의 비율을 나타낸다. 이 경우 눈이 일부 남아있는 지역에 새로운 눈이 오게 되면 일정 기간동안은 눈이 100 % 남아 있게 되지만 시간이 경과함에 따라 다시 감소곡선상으로 되돌아 가게 된다. 이 때 일시적으로 100 % 눈이 덮혀 있는 상태의 물당량  $w_{lla}$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$w_{lla} = w_{in} + 0.75 Q_{ns} \quad (16)$$

여기서  $w_{in}$ 은 새로운 눈이 오기 바로 직전의 면적 물당량,  $Q_{ns}$ 은 새로 오는 눈의 량을 나타낸다. 또한  $S_{cd}$ 는 새로운 눈이 오기 바로 직전의 감수 곡선상의 적설 면적을 나타낸다. 식 (15)로부터 계산된  $S_c$ 는 용설, 음의 열저류(negative heat storage) 계산시 보정 계수로 사용된다.

**적설에서의 액체수(liquid water) 전달** : 지표면에 쌓여 있는 눈으로부터 공기중으로 열이 방출된다면 이는 지표면의 눈이 녹는데 역 기능을 하게된다. Anderson은 이를 음의 열저류(negative heat storage)  $w_{ns}$ 라 정의하였다. 즉 눈표면이 녹아 액체 물당량(liquid water storage)이나 용설 유출의 변화 시키려면 음의 열저류가 0이 되도록 열이 공급되어야 한다. 따라서 적설로부터 유출되는 이론적인 초과수(excess water)의 양( $Q_{ew}^*$ )은 다음 식 (17)로 표현될 수 있다.

$$Q_{ew}^* = P_x + \phi_s - w_l^o - w_{ns} \quad (17)$$

여기서  $P_x$ 는 강수량,  $\phi_s$ 는 공기와 눈이 접해있는 눈표면과 토양과 눈의 접촉면으로부터 야기되는 용설총량,  $w_l^o$ 는 액체 수능(liquid water holding capacity)으로 다음 식과 같이 정의된다.

$$w_l^o = \delta_k w_l \quad (18)$$

여기서  $\delta_k$ 는 액체 수능의 %로서 대부분의 경우 약 2~5 %의 값을 가진다.

Anderson(1973)은 Central Sierra Snow Laboratory

에서 lysimeter를 이용한 실험결과로부터 초과 액체수(excess liquid-water)는 먼저 지체된 후 감쇠된다는 사실을 발견하고, 이들 자료를 이용하여 적설의 지체시간  $\xi$ (hrs)와 유출량  $Q_\eta$ (in/6 hr)에 대한 다음 식 (19), (20)을 제시하였다.

$$\xi = 5.33 \left[ 1 - \exp \left( -0.03 \frac{w_l}{Q_{ew}^*} \right) \right] \quad (19)$$

$$Q_\eta = \frac{Q_s^* + Q_{\xi 1}}{1.0 + 0.5 \exp \left( -83.5 \frac{Q_{\xi 1}}{w_l^{1.3}} \right)} \quad (20)$$

여기서  $Q_s^*$ 와  $Q_{\xi 1}$ 는 그림 1에서와 같이 현재 시간에서 저류고의 초과 액체수량(excess liquid-water)(in/6 hr) 및 지체된 유입량을 나타낸다.

### 3. 용설을 고려한 유출모형

용설모형은 Sacramento 모형과 결합되어 유출해석을 할 수 있다. 기존의 Sacramento 모형은 비교적 손쉽게 구할 수 있는 강우량과 증발량 자료를 모형의 입력치로 하여 유출량을 계산하는 모형이나 용설의 영향을 고려하기 위해서는 대기온도 자료가 추가적으로 필요하다. 즉 대기온도가 강설과 강우의 구별점 온도에 해당하는 매개변수  $P_{sw}$ 보다 높으면 강수량은 강우량으로 간주되나, 대기온도가  $P_{sw}$ 보다 낮으면 강설량으로 간주된다. 만약 지표면에 눈이 없는 상태에서 대기온도가  $P_{sw}$ 보다 높으면 용설모형은 계산을 수행하지 않는다. 그러나 시간이 진행됨에 따라 새로운 눈이 오거나 지표면에 눈이 쌓여 있는 상태에서는 용설모형에서 온도변화에 따라 적설의 열수지 및 불수지를 산정하게 되고 그 결과 초과 용해수의 양이 산정되게 된다. 이 계산치는 Sacramento 모형의 입력치가 되어 유출량을 계산하게 된다. 본 연구의 용설모형에 대한 기본 계산 시간간격은 6시간이므로 일유출량 계산을 위해서는 용설모형이 내부적으로 4회 계산된다. Sacramento 모형은 이미 국내에서도 적용되어 배덕효와 조원철(1995), 신용노(1996), 심순보 등(1996), 이상호 등(1997) 등에 의해 모형의 유용성이 검증된 바 있다. 본 연구에 사용된 Sacramento 모형은 배덕효와 조원철(1995)의 내용과 동일하므로 자세한 모형의 지배방정식 및 특성 등은 생략하고자 한다.

#### 4. 모형적용 및 해석

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

본 연구에 필요한 수문자료로는 모형의 입력자료로 요구되는 강수량, 잠재 증발량, 대기온도 자료 및 모형의 계산 및 검증에 위한 유량, 강설량 자료이며, 모형의 계산 및 검증에 이용된 기간은 1990년 1월 1일~1996년 12월 31일의 7년간의 일자료이다. 소양강 댐 상류유역에는 수자원공사에서 운영하는 12개의 자기우량 관측소(T/M)이 있으나, 대부분의 강우 동절기인 11월에서 다음 해 3월까지는 운영되지 않고 있는 실정이므로 본 연구에서는 내린천 유역의 유역평균강수량을 산정하기 위해서 수자원공사의 창춘, 방동, 상남, 현리, 귀둔, 군량, 인제 자기우량 관측소 자료 이외에도 건설교통부의 명개, 추대 관측소의 강수량 자료를 이용하여 산술 평균법으로 산정하였다. 대기의 일 최대, 최소 온도 및 증발잠시에 의한 잠재 증발산 자료는 인제 측후소의 자료를 이용하였다. 또한 유역의 출구점에 해당하는 내린천 수위표 지점의 관측 수위를 유량으로 환산하기 위해서 수위-유량 관계곡선식을 사용하였으며, 최근에 추정된

$$Q = 122.393118 (H - 0.463)^{1.446412} ; H \geq 0.463$$

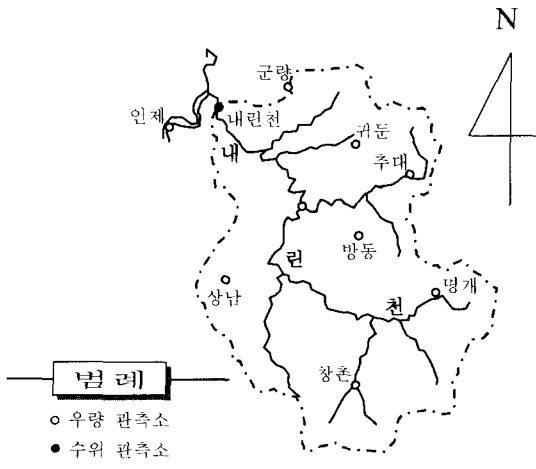


그림 2. 내린천 유역도

(한국수자원공사, 1996)을 이용하였다. 전체 7년의 일자료 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. 이들 모형의 매개변수를 추정하기 위해 초기추정 및 수동보정법(manual estimation), 자동추적법(automatic estimation)을 병행하였다. 수동보정법은 임의의 매개변수 값에 대한 모형의 모의 결과를 관측치와 비교하여 사용자의 주관에 따라 모형의 매개변수를 조정하는 기법이며, 자동추적법은 최적화 기법을 사용하여 수렴한계치의 변화에 따라 매개변수를 추정하는 기법으로 본 연구에서는 Downhill Simplex법(Press 등, 1986)을 사용하였다. 본 연구의 모형에는 융설모형과 강우-유출 모형에 각각 매개변수가 포함되어 있으므로 이들의 영향을 분리하기 위해서 모형의 매개변수 산정기간인 '93~'96년 가운데 동절기(11~4월)과 비동절기(5~10월)의 두 기간으로 분리하여 매개변수를 추정하였다. 즉 먼저 비동절기 동안의 자료를 이용하여 매개변수의 초기추정 및 자동추적법으로 강우-유출모형의 매개변수를 추정한 후, 동절기의 자료를 이용하여 Anderson(1973)이 제안한 초기 추정치와 수동보정법에 의해 융설모형의 매개변수를 결정하였다. 실제로 이와 같은 접근 방법은 융설량의 관측 자료가 없는 지역에 융설모형을 적용하고자 할 경우 외국에서도 많이 활용되고 있는 방법이다. 표 1은 Anderson(1973)이 제안한 융설모형의 내린천 유역에 대한 매개변수 추정치를 나타낸다.  $\varphi_s$ 는 대기온도가  $P_{sw}$ 보다 낮아 강설로 간주되면 바람의 영향으로 결손된 강수량을 보정하는 계수이며,  $R_{av}$ 는 강설의 지역적 분포에 따른 강설지역과 비강설지역의 증발량 계산을 위한 매개변수이다.

그림 3은 내린천 수위표 지점을 유역출구로 하는 내린천 유역에서의 모형의 적용성을 나타낸다. 그림 3의 MAP는 유역 내외에 존재하는 9개 점 강우 관측지점으로부터 산술평균법에 의해 계산된 유역평균강수량이며,  $Q_{obs}$ 는 내린천 수위표 지점에서 관측된 수위-유량관계 곡선으로부터 환산한 유량(m<sup>3</sup>/sec)을 유역면적으로 나누어 유량깊이(mm/day)로 나타낸 것이다. 이 기간 동안에는 '90년, '95년 홍수와 '94년 가

표 1. 용설모형의 매개변수 및 정의

| 기 호         | 정 의                                    | 추정치   |
|-------------|--|-------|
| $P_{sw}$    | 눈과 강우의 구별점 온도(°F)                      | 32.7  |
| $\varphi_s$ | 우량계 강설 결손치의 보정계수                       | 1.48  |
| $T_b$       | 비강우시 용설의 기저온도(°F)                      | 32.0  |
| $M_{fx}$    | 비강우시 최대 용설계수(in/6hr/°F)                | 0.032 |
| $M_{fn}$    | 비강우시 최소 용설계수(in/6hr/°F)                | 0.017 |
| $\kappa$    | 선행온도지수 매개변수(0.0-1.0)                   | 0.30  |
| $NM_{fx}$   | 최대 음의 용설계수(in/6hr/°F)                  | 0.005 |
| $w_{la}$    | 항상 100 % 적설이 유지되는 유역 평균 물당량 (in)       | 4.02  |
| $\delta_k$  | 액체수능(liquid-water holding capacity)의 % | 0.154 |
| $Q_{gm}$    | 일일 토양면 용설량                             | 0.017 |
| $\hat{u}$   | 강우시 6시간 평균 풍속                          | 0.324 |
| $R_{ae}$    | 100 % 강설파복하에서 증발산 발생 면적비 (%)           | 0.20  |

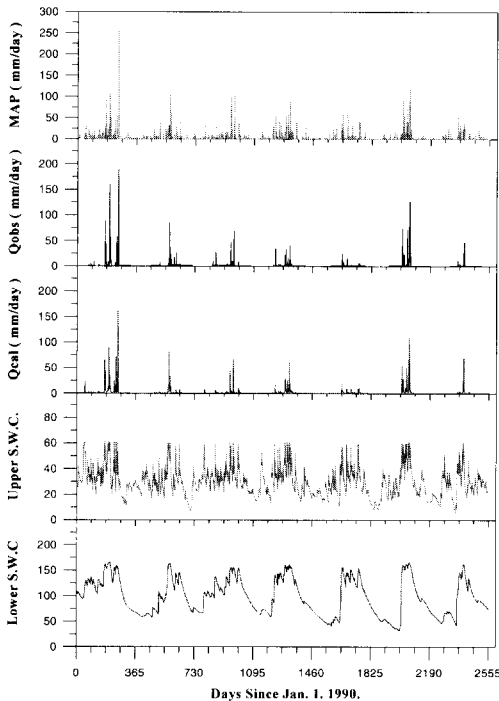


그림 3. 내린천 유역에서의 모형의 적용성

뚝과 같은 고유량과 저유량 해가 포함되어 있음을 알 수 있다. 그림 3의 Upper S.W.C.와 Lower S.W.C.는 유역평균강우량과 증발량 자료를 입력치로하여 Sacramento 모형에서 계산된 상층부 및 하층부 토양 수분의 시간적 변화를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는

것처럼 상층부 토양수분은 계절에 상관없이 입력되는 강우량의 유무에 따라 직접적으로 변화하지만, 하층부 토양수분의 변화는 뚜렷한 계절적 변동성을 나타냄을 알 수 있다. 그림 3의  $Q_{cal}$ 은 유역평균강우량, 증발량을 입력치로하여 Upper S.W.C.와 Lower S.W.C.와 같은 토양수분 상태가 고려된 후 계산된 하천 유량을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 계산유량과 관측유량을 비교할 때 가뭄해와 홍수해를 포함하여 하천 유량을 비교적 잘 모의함을 알 수 있다. 그러나 본 연구대상 유역에는 동절기 유량 관측자료가 존재하지 않으므로 모형에 의한 용설기 유출계산 결과의 정확성을 직접 비교·검토할 수 없기 때문에 그림 4에서와 같이 간접적으로 검증하였다. 향후 관측자료가 보완되면 직접적인 평가가 가능하리라 생각된다. 표 2는 동절기의 용설기간을 포함하여 이들 관측유량과 계산유량의 통계 특성치를 나타낸다.

그림 4와 그림 5는 특정기간('90. 1. 1.~'90. 3. 31) 동안 용설모형의 거동 특성 및 이와 같은 용설이 하천 유출에 미치는 영향을 나타낸다. 편의상 용설모형의 거동 특성이 다른 3단계, 즉 적설 이전(혹은 미소 적설) 단계인 1월 1일~1월 29일(시간단계 1~29), 적설단계인 1월 30일~2월 17일(시간단계 30~48), 적설 이후 단계인 2월 18일~3월 31일(시간단계 49~90)로 나누었다. 그림 4에서 알 수 있는 것처럼 첫 번째 단계에서의 온도(범례의 Air Temperature)는 0 °C를 축으로 하여 영상과 영하의 온도가 교차하는 상태이다. 이 기간동안에 영하의 기온에서 내린 강수는 시간단계 6



표 2. 관측유량과 계산유량의 통계적 결과

| 통계치             | 기간 | 계산기간<br>('93. 1. 1.~'96. 12. 31.) | 검증기간<br>('90. 1. 1.~'92. 12. 31.) |
|-----------------|----|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 침투유량의 상대오차 (%)  |    | -13.99                            | -15.24                            |
| 유출용적 오차 (%)     |    | -14.51                            | -15.51                            |
| 평균잔차 (mm/day)   |    | 1.10                              | 1.75                              |
| 평균제곱오차 (mm/day) |    | 3.66                              | 5.74                              |
| 상관계수            |    | 0.84                              | 0.83                              |

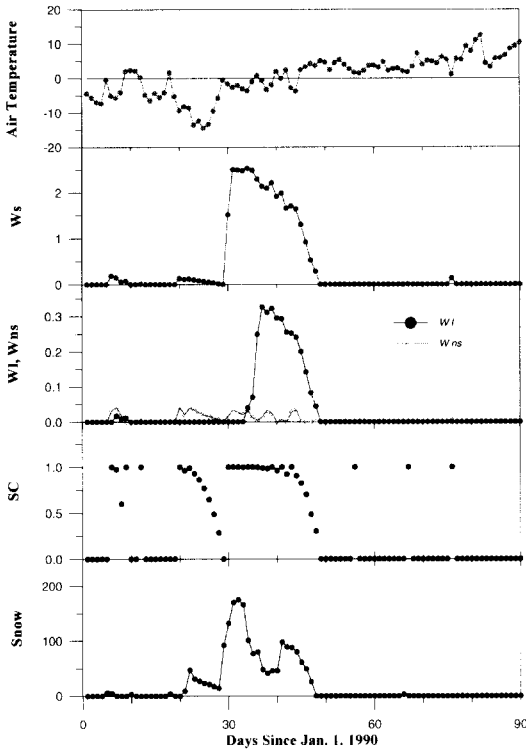


그림 4. 융설모형의 거동특성

의 일평균 기온  $-5.1^{\circ}\text{C}$ , 강수량  $3.5\text{ mm}$ 와 시간단계 20의 일평균 기온  $-9.4^{\circ}\text{C}$ , 강수량  $2.5\text{ mm}$ 이고 나머지 강수량은 영상의 기온에서 내린 것이다. 따라서 적설물당량 ( $W_s$ ), 액체물당량 ( $W_l$ ) 및 융의 열 저류고 ( $W_{ns}$ )는 미세한 변화를 나타냈다. 두 번째 단계에서는 영하의 기온에서 총  $59.55\text{ mm}$ , 영상의 기온에서  $4.25\text{ mm}$ 의 강수량이 기록되었다. 이 기간 동안에서 초기 강설기간 동안에는  $W_s$ 가 증가하게되나 후반부 온도가 영상으로 올라가면서 감소하는 모양을 나타낸다. 이에 비해  $W_l$ 은 온도변화에 따라  $W_s$ 보다 다소 지

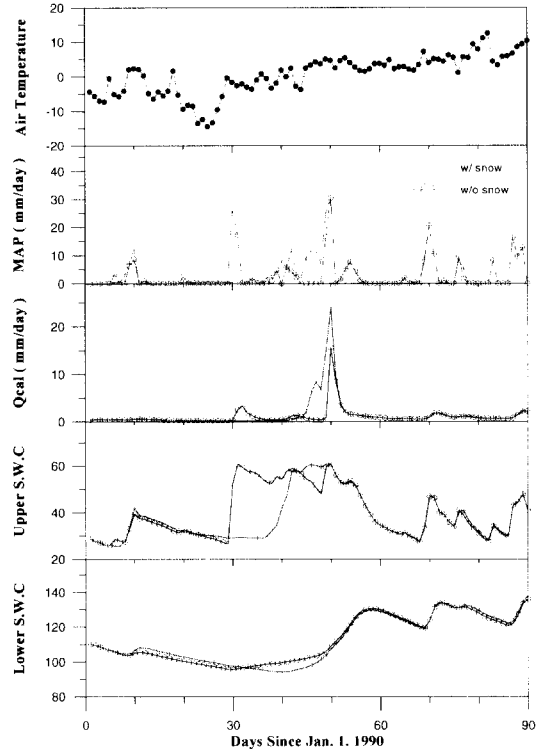


그림 5. 융설이 토양수분 및 유출에 미치는 영향 검토

체된 이후에 증가하다가 온도가 영상으로 올라가면서 감소하는 거동 특성을 보이고 있다.  $W_{ns}$  역시 온도 변화에 의한 얼수지 변화에 따라 변하는 특성을 나타내고 있다. 세 번째 단계는 대부분의 온도가 영상인 상태에서 강수량이  $166.80\text{ mm}$ 가 내린 경우이다. 이 기간 동안에 내린 강수량은 온도가 영상이라 융설모형에서는 강우량으로 간주하므로 융설 요소의 변동도 거의 없는 상태이다. 그림 4의 SC는 모형에 의해 계산된 적설의 지역적 분포를 나타내며, Snow는 인제 측후소에서 관측된 적설량을 나타낸다. 본 연구 대상 지역을 포

함한 국내 타 지역의 경우에 용설 요소를 정량적으로 평가할 관측 자료의 부족으로 정량적으로 판단할 수 없지만, 그림 4의 SC와 Snow로부터 용설모형의 적용성에 대한 정성적인 검증은 가능하다고 생각된다. 즉 그림에서 알 수 있는 것처럼 제 1단계 후반부 및 제 2단계의 전 기간 동안에 모형에 의해서 계산된 적설분포를 나타내는 SC의 시간적 변동성과 인제 측후소에서 관측된 적설량의 시간적 변동성은 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

한편 그림 5에서는 용설모형 유무에 따른 토양수분 및 하천 유량의 시간적 변동성을 나타낸다. 그림 4에서와 같이 전 기간을 3단계로 구분할 때 제 1단계의 경우 시간단계 6에서의 미소 적설량은 토양수분의 변화에 미소하게 영향을 미치지만, 이들 적설량이 적어서 하천 유량에는 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 그러나 제 2단계에서는 용설모형의 유무에 따라 토양수분 및 하천 유량은 매우 다른 양상을 나타낸다. 즉 용설모형을 고려하지 않은 경우 시간단계 30, 31의 강수량 26.35 mm, 17.20 mm은 강우량으로 간주되어 토양수분 및 하천유량에 바로 영향을 미쳐 시간간격 32에서 3.3 mm/day의 하천 유량이 계산되지만, 용설모형을 고려할 경우 시간 단계 30, 31은 온도가 영하이므로 적설로 간주되어 토양수분 및 하천 유량에는 영향을 미치지 않는다. 이와 같은 적설은 시간이 지남에 따라 온도가 영상으로 상승하는 시간단계 40~42, 45~48에서 용설이 집중적으로 발생하여 토양수분이 거의 습윤상태가 되었고 온도가 영상인 시간단계 49~50에서 발생한 강우량 46.9 mm에 의해 하천 유량의 증가를 가져왔다. 이와 같이 용설모형의 사용 유무에 따라 토양수분 및 하천유량에 미치는 영향은 매우 다름을 알 수 있다.

## 5. 결론 및 향후과제

일반적으로 용설은 지표에 쌓여 있는 강설량으로부터 물로 전환되는 물리적 과정을 설명한다. 이 과정의 기본 개념은 열역학 방정식과 에너지 방정식에 기초를 두고 있다. 동결기에 보다 정확한 유출해석을 하기 위해서는 용설모형 이외에도 토양면의 동결과 융해의 영향을 고려할 수 있어야 하며, 모형의 매개변수 추정 및 검증을 위해서 강설량의 지역적 변동성과 용설량에 관한 관측 자료가 요구된다. 그러나 용설에 관한 자료는 측정하기도 매우 어려울 뿐만 아니라, 국내에서는 아직 용설에 관한 실험이나 수치모형에 대한 연구가

거의 없는 실정이므로 본 연구에서는 비교적 지역적 영향을 적게 받는 개념적 용설모형(conceptual snowmelt model)을 선정하여 소양강의 제 1지류인 내린천 유역을 대상으로 연구를 수행하였다. 국내에서 용설 관련 관측자료의 부족으로 정성적인 해석은 어려웠지만, 모형에 의해서 계산된 적설의 지역적 분포와 측후소에서 관측된 강설량 자료의 시간적 분포상태는 매우 정확히 일치하는 것으로 판단해 볼 때 본 연구에서의 모형 적용성은 매우 우수한 것으로 판단된다. 또한 용설 모형의 적용 유무에 따라 토양수분 및 하천 유량에 미치는 영향은 매우 상이함을 알 수 있었다.

향후 우리나라 북부 지방의 동절기 유량 관측 및 적설에 관한 관측 자료가 확보되면 용설의 영향에 관한 보다 정확한 해석이 가능하리라 판단된다. 이와 같은 연구 결과는 수자원 계획 및 관리, 갈수량 분석 및 가뭄 연구, 이상기온 현상에 따른 유출의 변화특성 해석 등에 직접 응용될 수 있을 것으로 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 1997년 한국학술진흥재단 지방대육성성과제 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 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. 충남대학교 대학원 토목공학과, 석사논문, p. 135
- 심순보, 박노혁, 김선구, 김주훈, 고덕구 (1996) "한강 수계의 홍수 예측을 위한 강우-유출 모형의 비교" 한국수자원학회논문집, 제29권, 제6호, pp. 237-247.
- 이상호, 김영성, 신용노 (1997) "한강수계 다목적댐 하류 일 유출 모의 연구." 한국수자원학회논문집, 제30권, 제6호, pp. 575-585.
- 한국수자원공사 (1996) 소양강 다목적댐 관리연보.
- Anderson, E.A. (1973) *National weather service river forecast system-snow accumulation and ablation model*. NOAA Tech. Memo. NWS-HYDRO-17, Silver Spring, Md.
- Anderson, E.A. (1976) *A point energy and mass*

- balance model of a snow cover.* NOAA Technical Report NWS 19, Silver Spring, Md.
- Bras, R.L. (1990) *Hydrology-An Introduction to Hydrologic Science.* Addison-Wesley, Reading, Mass.
- Curtis, D.C. and Schaake, J.C. Jr. (1979) "The NWS extended streamflow prediction technique." Presented at the *Engineering Foundation Conference: Water Conservation - Needs and Implementing Strategies*, Rindge, New Hampshire.
- Day, G.N. (1990) *A methodology for updating a conceptual snow model with snow measurements.* NOAA Technical Report, NWS 43, Silver Spring, Md.
- Linsley, R.K. (1943) "A simple procedure for the day-to-day forecasting of runoff from snowmelt." *Transactions American Geophysical Union*, Vol. 24, Part 3, pp. 62-67.
- Morris and Godfrey (1978) "The european hydrological system snow routine." *Proc. of Modeling of Snow Cover Runoff*, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Lab., Hanover, New Hampshire, pp. 269-278.
- Morris, E.M. (1985) *Hydrological forecasting*, Ch 7. Edited by M.G.Anderson and T.P. Burt, John Wiley & Sons Ltd., pp. 153-182.
- Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., and Vetterling, W.T. (1986) *Numerical recipes The art of scientific computing.* Cambridge Univ. Press, pp. 289-293.
- Speers, D., Kuehl, D., and Schermerhorn, V. (1978) "Development of the operational snow band SSARR model." *Proc. of Modeling of Snow Cover Runoff*, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Lab., Hanover, New Hampshire, pp. 369-378.
- Sugawara, M., Watanabe, I., Ozaki, E. and Katsuyama, Y. (1984) *Tank model with snow component.* Research Notes of the National Research Center for Disaster Prevention, No. 65, National Research Center for Disaster Prevention, Science and Technology Agency, Japan.
- U.S. Army Corps of Engineers (1972) *Program description and user manual for SSARR model.* Portland, Oregon.
- Wankiewicz, A. (1978) "A review of water movement in snow, In proceedings: modeling of snow cover runoff." ed. S. C. Colbeck and M. Ray, U.S. Army, CRREL, Hanover, NH, pp. 222-252.
- Willen, D.W., Shumway, C.A., and Reid, J.E. (1971) "Simulation of daily snow water equivalent and melt." *Proceedings of Western Snow Conference*, Billings, Montana, pp. 1-8.
- Zuzel, J.F. and Cox, L.M. (1975) "Relative importance of meteorological variables in snowmelt." *WRR*, 11, pp. 174-176.

## 기 호

- $ATI$  : 눈표면의 선행온도지수
- $D_{ju}$  : 1월 1일부터의 일차
- $E_{as}$  : 공기와 눈표면의 전도열
- $E_e$  : 잠열
- $E_e^*$  : 잠열변화에 따른 액체상태 물의 총량
- $E_h$  : 현열
- $E_{ie}$  : 지표면의 장파 복사열
- $E_{hw}$  : 장파 복사열
- $E_n$  : 순복사열
- $E_p$  : 강우로부터 눈에 전달되는 열
- $E_{rl}$  : 반사장파 복사열
- $E_{rs}$  : 반사단파 복사열
- $E_{ss}$  : 눈과 토양면의 전도열
- $E_{sw}$  : 단파 복사열
- $K_s$  : 토양의 열전도도
- $L_v$  : 잠재 증기화열
- $M_f$  : 융해계수
- $M_{ju}$  : 비강우시 최소 융설계수
- $M_{fx}$  : 비강우시 최대 융설계수

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| $NM_f$ : 음의 용해계수                    | $W_s, w_s$ : 적설물당량                                   |
| $NM_{fn}$ : 최소 음의 용해계수              | $e_n$ : 눈표면의 증기압                                     |
| $NM_{fx}$ : 최대 음의 용해계수              | $e_s$ : 공기의 증기압                                      |
| $P_{sw}$ : 강설과 강우의 구별점 온도           | $f(\hat{u})$ : 풍속의 함수                                |
| $P_X$ : 강수량                         | $p_o$ : 지표면의 대기압                                     |
| $Q_{ew}^*$ : 적설의 이론적 초과수량           | $\hat{u}$ : 강우시 6시간 평균 풍속                            |
| $Q_{gm}$ : 일일 토양면 융설량               | $w_{la}$ : 100 % 눈덮힌 상태의 유역평균물당량                     |
| $Q_{ns}$ : 새로 오는 눈의 량               | $w_{ln}$ : 새로운 눈이 오기 직전의 면적물당량                       |
| $Q_s^*$ : 현시간의 저류고 초과액체수량           | $w_{lta}$ : 일시적으로 100 % 눈덮힌 상태의 물당량                  |
| $Q_\eta$ : 적설의 지체 유출량               | $w_l^o$ : 액체수능                                       |
| $Q_{\xi 1}$ : 지체된 유입량               | $z_{100}$ : 100 m 단위로 환산한 고도                         |
| $R_{ae}$ : 증발산 발생 면적비               | $\Phi_s$ : 눈표면의 융설총량                                 |
| $R_B$ : Bowen비                      | $\Phi_{sd}$ : 비강우시의 융설량                              |
| $R_{wi}$ : 유역평균물당량과 $\delta_s$ 의 비율 | $\Phi_{sr}$ : 강우시 융설량                                |
| $S_c$ : 적설의 지역적 분포                  | $\Phi_{ss}$ : 토양과 눈접촉면의 열변환                          |
| $S_{cd}$ : 새로운 눈 직전 감수곡선상의 적설면적     | $\delta_k$ : 액체수능의 %                                 |
| $T_b$ : 비강우시 융설의 기저온도               | $\delta_s$ : $\text{Min}(\text{강설후의 최대물당량}, w_{la})$ |
| $T_f, T_{sf}$ : 대기 및 눈표면의 온도(°F)    | $\kappa$ : 선행온도지수 매개변수                               |
| $T_h, T_{sh}$ : 대기 및 눈표면의 온도(°K)    | $\xi$ : 적설의 지체시간                                     |
| $W_E$ : 증발율                         | $\varphi_s$ : 우량계 강설 결손치 보정계수                        |
| $W_l, w_l$ : 액체물당량                  |  |
| $W_{ns}, w_{ns}$ : 음의 열저류고          |  |

(논문번호:98-064/접수:1998.10.21/심사완료:1998.12.04)