

기후변화에 따른 수자원 영향평가를 위한 용설의 개념 및 장기유출 모의 평가방법의 제안



김성준 |
건국대학교 사회환경시스템공학과 부교수
kimsj@konkuk.ac.kr



임혁진 |
건국대학교 지역건설환경공학과 석사과정
hyukjin@konkuk.ac.kr

1. 서론

댐, 하천 뾰리고 유역간의 원활한 이·치수를 위한 수리 구조물과 운영과정, 수로 건설 및 하천정비, 산 지개간, 도시화 등 유역개발 등은 수문환경에 큰 영향을 미치게 된다. 이런 인위적인 결과에 따른 수문 환경 변화 외에 자연적인 변화로는 최근 지구온난화에 따른 국지기후의 변화 그리고 이에 따르는 토지피복의 변화가 될 것이다.

지구온난화로 인한 기후패턴의 변화는 기온의 상승, 강수패턴의 변화, 증발산량의 증가 및 유출의 계절적 변동 등을 초래하여 미래의 수문 순환과정은 과거와는 다른 양상으로 변화될 수 있으며, 우리나라는 그동안 매년 겨울이 피하는 봄가뭄, 몬순기후에 의한 장마시기, 그리고 가을의 태풍에 의한 호우동반 등의 기상 사이클에 의존하는 지표수 위주의 수자원 개발과 관리에 의존하여 왔는데, 이는 향후 작은 기후변동으로도 심각한 수자원 문제를 발생시킬 수 있는 위험에 노출될 가능성이 높다고 판단된다.

지금까지의 수자원 계획은 미래의 수문조건이 과거와 같다는 가정에서 이루어져 왔다. 따라서 기후변화 및 수문환경 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 수자원의 장기적인 관리 및 계획을 수립하기 위해서는 기후변화와 수문관계가 지역적 차원에서 예측되고 평가되는 시스템의 구축이 필요하다고 하겠다.

우리나라의 경우 지형적으로 70% 정도가 산악 지역인 점을 감안할 때 지형적 영향에 의해 국지 규모의 다양한 기후 특성과 수문환경의 변화가 나타난다. 북동부 산악지형의 경우, 강수의 빈도 및 수량이 계절적 특성에 따라 현격한 차이가 발생함에 따라 수자원의 양적측면의 평가에서는 겨울철 적설과 용설의 연구가 필수적이다. 이는 특히 최근 겨울에 발생한 바 있는 영동 및 중부지방의 폭설에 의한 피해도 경감시킬 수 있는 기반을 마련할 수 있을 것으로 생각된다.

본 고에서는 적설 및 용설에 관한 기초적인 사항과 적설 및 용설에 관한 미계측지역의 용설 관련인자를 RS, GIS 자료를 활용하여 추정가능한 도출방법의 소개와 더불어 용설 모의과정을 포함하는 장기 강수-유출해석에 있어 국내 수문환경 하에서 사용가능한 유출모형의 선정기준을 제시해 보고자 한다.

2. 용설의 개념 파악 및 수문학적 거동

2.1 용설의 개념

강수는 대기온도에 따라 강우와 강설로 구분되며 이 중 겨울철에 발생한 강설이 쌓여 적설(snowpack)이 발생하게 된다. 적설 분포된 지역에서 지형 및 대

기온도의 상태에 따라 적설이 용해되어 눈과 얼음의 결정들이 액체상태의 물로 변환하게 되어 유출되는 현상을 '용설(snowmelt)' 이라 하고 이는 수문학적으로 하천유출에 지대한 영향을 미치게 된다. 일반적으로 세계 대부분의 지역에서 하천 유출량은 용설에 의해 발생하는 수자원의 양이 대부분을 차지하고 있다(Chow, 1984). 그러나 국내의 경우 적설에 의한 유출의 영향은 대부분이 용설이 발생하는 봄철에 집중됨으로써 지하수와 지표유출 특성에 큰 영향을 미친다. 용설에 의한 유출량은 토양수분과 밀접한 관계를 가지며 용설에 의해 유출되는 수자원의 양은 그 해의 가뭄과 홍수를 야기하는 중요한 요소가 된다. 일반적으로 눈(snow)은 '대기 중에서 부유, 성장 또는 낙하하는 물의 고체형태'를 말한다. 기본적으로 눈의 결정체는 육각형의 형태를 띠고 있으며, 결빙의 직경, 응집력, 결정체의 수분의 함유량에 따라서 분

류하고 있다. 결빙의 형태는 강설의 적설시 결빙간의 공극의 부피를 좌우함으로써, 공극을 차지하는 수분의 양인 눈의 물당량(snow water equivalent)을 결정짓게 된다.

미 공병단(USACE)에서는 결빙의 형태를 세분화하여 적설발생시점의 강설의 상태(신설, 노년설, 결빙의 상태), 경도 및 습도 등으로 나누어 세분류하고 있다. 적설 및 용설의 영향을 수자원 분야에서 평가하기 위해서는 눈의 물 당량을 결정짓게 되는 강설의 결정형태가 중요하게 작용한다. 결정형태에 따라 결정사이의 간극은 대기온도의 상승, 강우의 발생, 신설의 발생 등으로 인하여 용해되어 결정들 간의 장력과 모관력에 의해 적설이 보유할 수 있는 최대 액체 물의 함유량에 해당하는 최대 액체 수능(liquid water holding capacity)이 될 때까지 물을 보유하고 있기 때문이다. 용설은 최대 액체 수능에 도달하

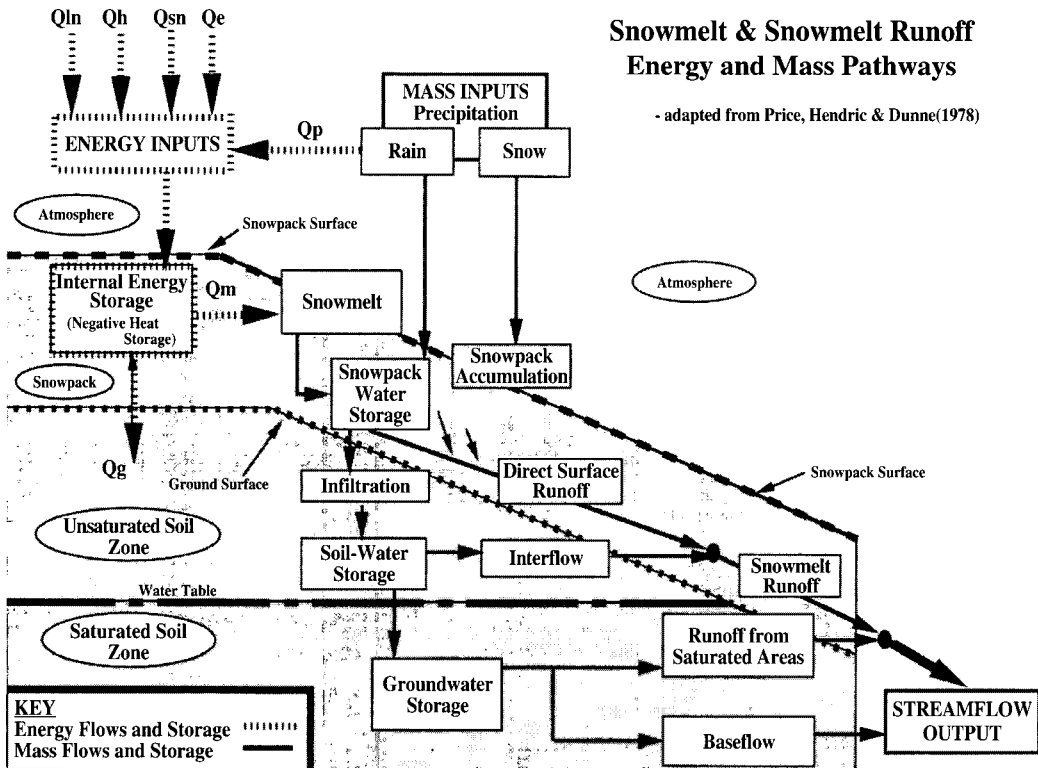


Fig 1. Snowmelt & Snowmelt Runoff Energy and Mass Pathways(Price, Hendrie & Dunne; 1978)

는 범위를 초과할게 될 경우 그 초과수가 일정한 지체 시간이 지난 후 중력에 의해 유출되기 시작하는 현상을 말한다.

2.2 용설의 수문학적 거동

적설의 형태로 존재하는 강설은 에너지 수지(energy mass balance)에 의해 용설로 발생하게 된다(Fig. 1). 용설이 발생하는 시점의 수문학적 거동은 적설내부의 눈의 상태의 변화, 유출의 흐름 및 지표면과의 접촉면에서의 유출의 흐름에 따라 나누어 살펴 볼 수 있을 것이다.

(1) 적설의 상태

초기의 강설은 밀도가 낮고 눈의 결정형태가 섬세하나 시간이 경과함에 따라, 눈의 결정형태가 조악해지고 밀도가 증가하게 된다. 밀도가 낮고 배열이 느슨하며 건조한 빙점이하의 적설에서 입상이 조악하고 습한 상태의 적설로 변형이 되는 상태를 눈의 숙화(ripening snow)라 말한다. 이런 숙화상태는 용설이 발생할 수 있는 초기 상태이며, 결정사이의 간극은 물로 채워지며 눈의 수분함량은 전 깊이에 걸쳐 균등하게 된다. 이는 대기온도가 0℃이상에 도달하거나 적설의 물 함유량이 포화상태에 도달하게 되어 유출이 발생하게 되는 것을 말한다. 적설의 숙화는 대부분 용설이 시작되는 봄철에 발생되며, 지표면의 토양 수분함량을 높여주게 된다.

(2) 적설층 내부에서의 용설의 흐름

용설의 발생은 지형적 인자의 영향을 많이 받게 된다. 지형적으로 경사 및 장애물에 의한 그늘진 지역(shadow zone)에서는 장파복사열의 손실로 인하여 지표면 층이 0℃이하가 되며, 적설의 표면층 아래로부터 25.4cm까지 깊이에 함유된 액체상태의 물들은 얼게 된다. 적설 상태에서 신설이 발생하게 되면 기존의 결정의 상태와 밀도, 물 당량의 차이로 인하여 설층이 발생하게 된다. 표면층은 복사열, 강수, 바람

의 대기상태에 영향을 받게 되며 표면아래층은 지열에 의한 영향을 받게 된다. 그 결과 내부의 적설층은 물 당량의 이동과 침투가 활발해지며 25.4cm 깊이 아래의 적설층은 얼지 않게 된다.

(3) 용설 유출의 흐름

용설은 일반적으로 수직적 또는 수평적 흐름을 가지고 있으나, 적설층에 형성된 얼음층에 의해 그 흐름이 가로막히거나 변하게 되어 불규칙한 흐름을 나타내게 된다. 그 결과, 적설의 중간층은 계속적으로 눈 결정의 형태와 크기가 변화하게 되며 적설은 용설, 재결빙 및 불투수성의 얼음층을 형성하기 때문에 적설 내부의 이슬점이 0℃ 내외에서 결정되게 된다(1978, Colbeck; 1973, Yosida). 불규칙적인 불투수층의 형성은 유출의 수직적 흐름을 방해하게 되며, 3~4 시간 이내의 지표면 유출 흐름을 늦추는 지체시간을 가지게 된다. 이런 지체현상은 유역면적이 518~777km²를 초과하는 중·대규모 유역에서는 무시하게 된다. 경사가 적당한 산악지역의 경우에는 수직적 흐름보다 수평적 흐름에 대한 지체시간이 크게 작용한다.

3. 강수-유출모형의 용설 모의방법 및 연산과정

용설 유출량을 모의하는 강수-유출모형의 기본 개념은 에너지수지모형(energy mass balance model)을 기본으로 하여 세 가지 방법으로 크게 구분된다; ① 온도자료로부터 경험적으로 용설 요소를 도출한 모형, ② 열변환 관계를 표현하기 위한 지수(index)를 사용한 모형, ③ 실제 열수지를 고려한 모형으로 나눌 수 있다(Day, 1990). 첫 번째 유형은 지표면에 쌓여 있는 눈의 상태를 고려할 수 있는 변수가 없는데 비해 두 번째, 세 번째 유형은 이들을 고려할 수 있는 모형이다. 대부분의 유출모형이 첫 번째 유형에 속하며 대표적인 모형으로는 Linsley(1943), USACE(1972), Sugawara 등(1984) 등이 있다. 두 번째 유형에 속하는 모형은 대부분 열 변환의 지수로

서 온도를 사용하여 강설과 강우를 구분 짓는 모형들이며 Willen 등(1971), Speers 등(1978)이 있다. 세 번째 유형에 속하는 모형은 복사, 가시 및 잠재열 등 실제 열 수지를 계산하는데 이 유형에 속하는 모형으로는 Anderson(1976), Norris와 Godfrey(1978) 등이 있다.

중위도 지역에서 강수는 0℃ 이하의 구름에서 물과 얼음의 형태를 가지게 되고 일반적으로 대기 중에서 용해되는 온도는 1.1℃~1.7℃로 보고 있다. 따라서 강설이 발생하여 지표면에 적설의 형태로 분포하기 위해서는 이슬점이 발생하게 되는 고도보다 높아야 하며, 반대로 강우가 발생하기 위해서는 이슬점 아래로 고도가 생성되어야 한다. 이는 산악지역에서 강설이 발생하게 되는 가장 중요한 요소로써, 기상과 지형적 인자의 지배에 의해 강설과 강우를 분리한다. 기상학적 인자로는 대기온도, 풍속, 강수량, 대기순환 패턴, 고도에 따른 기온 저감율, 안정적인 기단 등이 있으며, 강설이 발생하기 위한 지형학적인자로는 고도, 경사, 경사향, 산림피복정도, 종단율, 일사량 등이 있다. 눈의 물 당량은 대기온도와 풍속에 따라 체적의 6~30%까지 다양하며, 일반적으로 체적의 10%로 보고 있다. 시간이 경과함에 따라 속설의 경우, 결정체의 입상은 조악해지고 밀도는 증가하며 눈의 물 당량은 45~50%에 도달하게 된다. 속설이 발생하게 되면 용해된 3~5%의 자유수를 가지게 되며 적설의 간극을 포화시키면 초기 용설(primed) 유출이 발생하게 된다.

3.1 용설 모의방법의 형태

(1) Simplified method

온도자료로부터 용설요소(melt factor)를 경험적으로 도출하여 용설을 모의하는 방법으로 적설의 상태를 고려하지 못한다. 단기사상의 모의와 예측에는 적용할 수 있으나 장기유출에서는 부적합하다. 강수를 강우와 강설로 액체와 고체 상태로 구분 지어 모의가 수행되며 그 외의 적설의 상태에 대해서는 모

의가 불가능하다.

(2) Energy budget solution method

이론적으로 용설을 평가하기 위해서는 복사, 대류, 응결, 전도의 에너지의 이동을 규명해야하며, 이는 기상과 적설분포 지역의 환경특성과 높은 상관성을 가지고 있다. Gray와 Prowse(1992)는 용설이 발생하는 환경의 조건을 도표화하여 열에너지의 이동의 상관성을 도출하였다. 열수지 방법에 의한 지점에 대한 용설 유출량의 모의의 일반적 공식은 식 (1)과 같으며 매개변수와 수식은 다양한 조건의 현장실험에 의해서 그 기준치를 설정하고 있다.

$$M = \frac{Q_m}{334.9\rho_w B} \quad (1)$$

여기서 M 은 용설량(mm/day), Q_m 는 용설에 필요한 총 열 에너지, B 는 눈의 에너지 변환율(0.95~0.97), 334.9는 얼음의 잠재열량(kJ/kg), ρ_w 는 물의 밀도(kg/m³)이다.

(3) Temperature index method

실제 열수지 방법을 통한 용설의 유출량 모의는 가용성 있는 변수와 자료 부족의 문제로 인하여 장기유출해석에 있어서 많은 문제점을 나타내고 있다. 온도지수방법은 온도지수계수를 경험적으로 산정함으로써 열 변환 관계를 표현한 것으로 중·대규모의 유역과 하천유역의 용설 모의와 예측에 사용되고 있으며, 그 기본 방정식은 식 (2)와 같다.

$$M_s = C_m(T_a - T_b) \quad (2)$$

여기서 M_s 는 용설량(mm/day), C_m 는 용설률 계수, T_a 는 대기온도(℃), T_b 는 기본온도(℃)이다.

3.2 용설 모의의 수문모형 적용범위 및 방법

온도지수 용설 모의법은 단·장기 유출사상의 분석

Table 1. Snowmelt options¹(USACE, 1994)

Application	Example	Basin Configuration		Melt Calculation			
		Lumped	Distributed	Snow Condition	Simplified ²	Temp. Index	Energy Budget
Single-event analysis (Rain on snow)	hypothetical floods in coastal mountains	Yes	Possibly	Assumed 'ripe'	Possibly	Possibly	Possibly
Single-event analysis (Snow plus rain)	hypothetical floods in interior basins	Yes	Yes	Assumed 'ripe'	No	Yes	Yes
Single-event Forecasting (Rain on snow)	Short-term flood forecasting	Yes	Yes	Optional	Possibly	Yes	No
Single-event Forecasting (Snow plus rain)	Short-term flood forecasting	Yes	Yes	Optional	No	Yes	No
Continuous simulation (any environment)	Long-term flood and drought forecasting	No	Required	Required	No	Yes	Possibly
Detailed simulation in small watershed	Special applications	No	Required	Required	No	No	Yes

1. Qualitative indicator shown for type of option that might typically be used for application. This is a guideline only. "Yes" or "No" indicates suggested option
 2. Simplified approach might be to assume a constant- or variable-moisture input due to snowmelt

및 예측에 모두 가능하며 적설 상태를 고려할 수 있다. 장기적인 수자원의 계획 수립을 위해서는 장기유출모형이 고려되어야 하며 적설의 상태를 고려할 수 있는 모형의 구별이 필요하다. 미공병단(USACE)에서는 모형간의 적용 방법, 적용범위, 모의방법들을 다음 Table 1과 같이 각각의 호우사상에 대해 적용한 계를 분류해 놓고 있다.

우리나라의 강수사상에 대한 유출모형은 저류함수법의 집중형 모형을 대부분 사용하고 있으나 이것은 강수의 시공간적 변화를 반영하기에는 부적합하다. 이에 반해 분포형 모형은 시공간적 변화를 효과적으로 고려하지만, 중규모이상의 대유역에서 신뢰성 있는 하천 유출량을 모의하기 위한 입력자료 구성이 어렵다는 단점이 있다. 외국에서 개발되어 국내에 소개되어 이용되고 있는 장기 강수-유출 모형으로는 SWM-IV, HSPF, NWSRFS, API, SSARR, TANK, USDAHL-74, SHE, TOPMODEL, SLURP, PRMS 모형 등이 있으며, 이 중에서 용설의 모의 과정을 포함하고 있는 수문모형은 SWM-IV, HSPF, NWSRFS, SSARR, TANK, SLURP, PRMS 등이 있다.

3.3 장기유출모형의 용설모형 연산방법

수자원관리 측면에서 용설 모의의 분석과 예측을 위해서는 지속적인 기상자료 및 적설자료의 관측과 획득을 통한 장기유출 수문모형의 적용성 검토가 필요하다. 일반적인 장기유출모형의 용설 모의 방법은 Fig. 2와 같으며, 각 모형마다 용설의 모의 방법, 메커니즘 등이 서로 상이하거나 다른 특징을 가지고 있다. 용설모형의 선택에서는 사용자의 목적과 자료의 가용성 및 지형자료 등을 고려하여 적설에서 용설이 발생하는 물리적 작용을 충분히 표현할 수 있는 모형을 선택하여야 한다.

앞에서 살펴본 에너지 변환식을 통한 강우시와 무강우시의 용설에 대한 장기유출모형의 모의 방정식은 Table 2와 같다. 국내의 경우 산악지역의 식생군집 정도를 고려한 용설 방정식이 사용될 필요가 있다.

3.3.1 용설의 분석

적설분포면적의 측정 외에 용설을 모의하기 위해서는 다른 수문기상학적 인자들이 요구된다. 이런 다양한 변수들은 일반적으로 대기온도와 강수량을 최

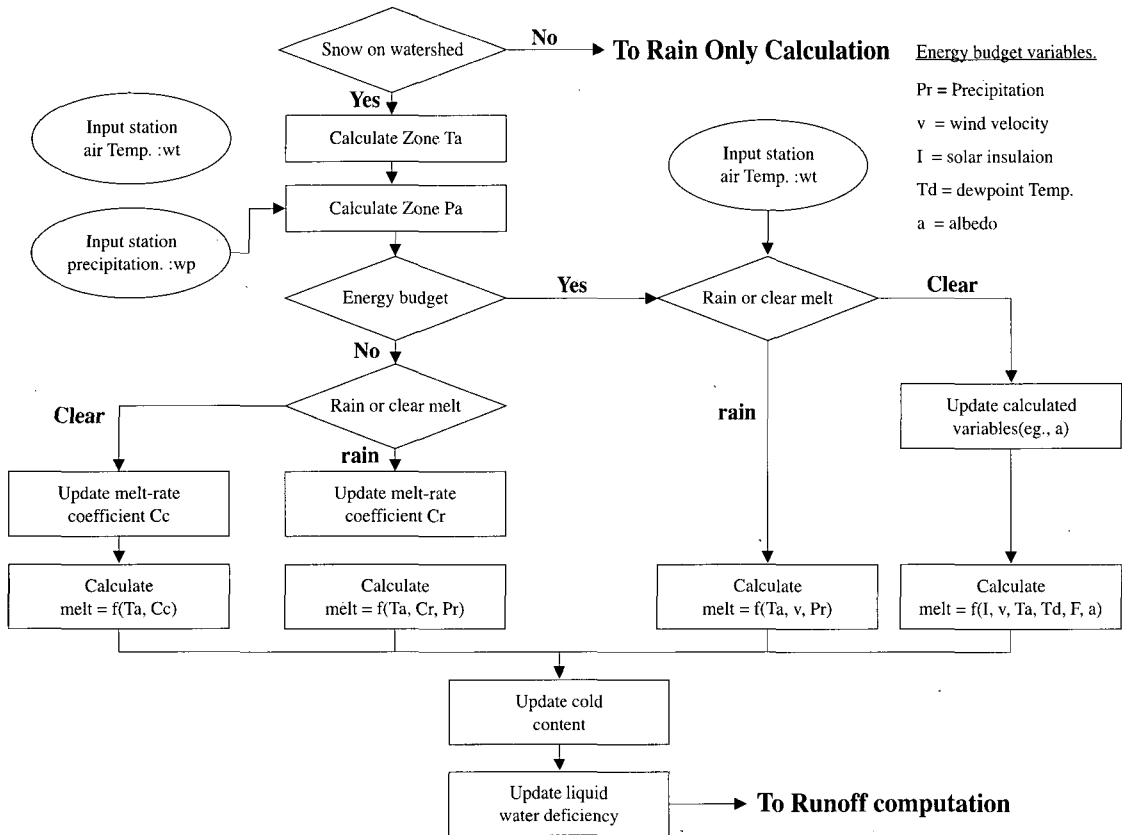


Fig. 2 Algorithm of snowmelt simulation, continuous simulation model (USACE, 1998)

Table 2. Summary of generalized snowmelt equations, rain/snow situation(USACE, 1998)

Description	Forest cover application	Equation
Snowmelt during Rain	Partly forested areas (10~60%)	$M = (1.33+0.239k+0.0126P_r)T_a+2.3$
	Forested areas (60~80%)	$M = (3.38+0.0126P_r)T_a+1.3$
Rain-free snowmelt	Open areas (<10%)	$M = k'(1-F)(1-a)(3.08I_i+(1-N)(0.969T_a-21.34)+N(1.33T_c))+k(0.239v)(0.22T_a+0.78T_d)$
	Partly forested areas (10~60%)	$M = k'(1-F)(1-a)(2.43I_i)+k(0.239v)(0.22T_a+0.78T_d)+F(1.33T_a)$
	Forested areas (60~80%)	$M = k(0.239v)(0.22T_a+0.78T_d)+F(1.33T_a)$
	Heavily forested areas (>80%)	$M = 3.38(0.53T_a+0.47T_d)$

M: snowmelt(mm/day), *v*: wind velocity(km/hr), *k*: basin convection-condensation melt factor
k': basin shortwave radiation melt factor, *P_r*: rainfall(mm/day), *I_i*: insolation(Mj/m²)
T_a: mean temperature of the saturated air(°C), *T_a*: air/snow temperature(°C), *T_d*: dew-point temp.(°C)
T_c: cloud/snow temperature(°C), *a*: average snow albedo, *N*: cloud cover, *F*: forest canopy

Table 3. Data requirements for snow analysis

Data type	Physical Element or Purpose	Application
Streamflow (Q)	a. Continuous discharge	a. Hydrograph analysis, model calibration
	b. Runoff volumes	b. Water supply analysis, forecasting
Precipitation (P)	a. Basin moisture input	a. Hydrograph analysis, model calibration
	b. Estimate of SWE	b. Water supply forecasting
Air temperature (Ta)	a. Rain/freeze interface	a. Modeling snow accumulation
	b. Index to all energy exchanges	b. Modeling snowmelt(temp. index)
	c. Factor in energy budget estimates	c. Modeling snowmelt(energy budget)
Snow water equivalent (SWE)	a. Estimate of precipitation	a. Analysis, model calibration
	b. Index to basin water supply	b. Water supply forecasting
	c. Snowpack quantity during ablation	c. Modeling snowmelt
Areal snow cover	a. Extent of basin snow cover	a. Modeling calibration
	b. Accumulation of snow	b. Parameter in forecast models
Snowfall	a. Extent of basin snow cover	a. SWE, precipitation applications
	b. Snowline elevation	b. Avalanche forecasting
Snow density	a. Estimate of SWE, precipitation	a. SWE applications
	b. Condition of snow	b. Avalanche conditions, snow loads
Snow depth	a. Estimate of SWE, precipitation	a. SWE, precipitation applications
	b. Estimate of weight	b. Snow load on structures
Snow albedo	Solar energy absorption	Modeling(energy budget), design floods
Solar radiation	Solar energy flux	Modeling(energy budget), design floods
Wind velocity (v)	Estimate of convection/condensation energy flux	Modeling(energy budget), design floods
Dewpoint temperature (Td)	Factor in estimation of condensation energy flux	Modeling(energy budget), design floods

소한으로 요구하나 열 수지법을 사용하여 유출을 모의할 경우, 풍속, 이슬점온도, 일사량 등의 다양한 자료가 필요하다. 장기유출모형의 용설 모의의 분석과 예측에 필요한 일반적인 입력자료는 Table 3과 같다. 용설 모의 모형을 보정하기 위해서는 10년 이상의 유출량자료를 사용하여 보정 및 검증을 하게 되며, 용설 모의 보정은 용설이 발생하지 않는 기간의 자료를 사용하여 보정한다. 산악지역의 용설 모의는 지형적 자료 면적-고도 자료, 토지피복 형태와 밀도, 유역의 경사와 경사향이 중요한 인자로 작용하게 된다. 국내와 같이 적설 및 용설에 대한 관측자료가 미흡한 실정에서는 관측자료 이외의 용설에 대한 매개

변수를 선정 및 추정하는 방법이 고려되어야 한다.

따라서 기존의 관측자료를 토대로 GIS, RS 기법을 적용하여 변수들을 추정 및 선정하는 방안이 고려되고 있다. 실제로 외국에서는 GIS, RS 자료를 사용하여 다양한 매개변수들을 추정하고 있으며 관측자료와의 검증을 통해 자료의 신뢰성을 높이고 있다. 국내의 경우, 장기유출모형을 사용하여 시기상으로 용설에 대한 영향을 북부 산간지방에 대하여 평가하고는 있으나 그 연구가 미흡한 실정이다. 특히, 용설을 해석하는데 있어서 가장 중요한 적설심, 적설분포면적, 눈의 물 당량, 눈의 밀도 등의 선정 및 추정은 이루어지지 않고 있다.

4. 국내 용설모형의 선정

기후변화에 의한 수자원의 용설에 의한 영향을 평가하기 위해서는 국내에 적합한 매개변수 추출 및 장기유출모형의 선정이 우선시 되어야 한다.

4.1 용설 모형의 선택방법 정립

적절한 용설 모형을 선택하기 위한 방법론은 다음과 같이 크게 네 가지로 구분할 수 있다. 모형을 선정하기에 앞서 국내실정에 맞는 안정적인 관측자료의 획득과 분석 목적에 맞는 모형을 선정하는 것이 용설 모형의 선택에 주요한 쟁점이라 하겠다.

- ① 모형의 모의 및 보정 자료의 가용성
- ② 지형적, 기상학적 입력자료의 정확성
- ③ 용설 모의 결과의 다양성 및 출력형태
- ④ 극기상(Extreme events)현상의 발생상태

용설 모형의 모의 및 보정자료의 획득은 모의 방법 및 모형의 선택에 있어서 큰 제약점으로 작용한다. 미계측 유역에서 적설 및 용설 자료의 획득이 용이하지

않기 때문에 어떤 용설 모형이든지 관측 유출량 및 개념적 열 수지법에 기초를 둔 최적화 기법이 필요하게 된다. 단순 온도지수함수법이나 복잡한 열 수지법이나 대기 상태와 지형적 인자는 용설 모의의 해석에 매우 중요하게 취급되며, 최적화 기법 또는 민감도 분석을 통해 보정된 용설 모형은 다른 지점에 다른 조건으로 적용함으로써 모형의 가용성과 이동성을 평가하여 정확한 모의가 될 수 있도록 분석하는 것이 가장 큰 목적이다. 또한, 모형이 실시간 예측이 가능한지의 여부도 용설 모형의 선정에 고려사항이 되겠다.

극기상 현상의 발생은 용설 모의 과정에서 경험적으로 산출된 용설 지수에 영향을 주는 변수로 작용하게 된다. 지수함수를 이용하여 용설을 모의할 경우, 경험적으로 산출된 지수는 일반적으로 정상적인 기상 형태 아래서 도출된 것이기 때문에 더욱 더 정확한 모의의 예측을 위해서는 물리적 이론에 기본을 둔 열 수지 방법의 접근이 필요하게 된다.

4.2 국내 용설모형의 접근성 및 적용성 분석

국내에 적용되어 모형의 가용성과 이동성이 검증

Table 4. Comparison of operational snowmelt models

Description		Model name				
		TANK	SSARR	NWSRFS	PRMS	SLURP
Snowmelt method	Energy budget method	.	O	S	S	O
	Temp. index method	S	S	S	.	S
Modeled components	Elevation correction	S	S	O	S	S
	Areal snow cover	.	S	S	S	S
	Forest/Open	.	O	.	S	S
	Heat deficit	.	S	S	S	S
	Water storage	.	S	S	S	S
	Density depth
	Frozen ground	.	.	O	.	.
Input data requirements	P	S	S	S	S	S
	T_a	.	S	S	S	S
	T_d	.	O	.	.	S
	U_z	.	O	.	.	S
	Q_{sin}	.	O	.	.	S

Note] S:Standard, O:Optional

된 장기유출모형 중 용설 모의가 가능한 몇 모형을 선정하여 용설 모의 방법과 용설의 흐름을 물리적으로 표현하는 모형의 구성 정도, 기본적으로 요구되는 입력자료 등을 Table 4에서 비교 분석하였다.

국내에 적합한 용설 모형의 선택에는 용설의 기작에서 가장 중요한 적설 분포 지역과 고도에 따른 적설의 상태에 따른 모의가 가능한지 여부가 가장 중요하게 생각되며, 입력자료의 구축과 모형의 접근성 등을 그 외로 구분하여 비교 분석하였다. 앞에서 제시한 네 가지 기본사항을 고려한 결과, SSARR, PRMS 및 SLURP 수문모형이 국내에 용설의 영향을 분석 및 평가하는데 있어 적절하다고 판단된다.

5. 용설 모형의 매개변수 정량화 방법

국내의 경우, 적설에 대한 관측자료가 기상기상관측소의 최심 적설심을 제외한 부분에 대해서는 자료가 전무한 실정이므로 위에서 언급한 적설 밀도, 적설 분포 면적, 적설의 물 당량 등은 추정 및 그 대안이 제시되어야 한다. 또한, 용설 모의에 있어서 지점자료의 활용은 그 대상이 중규모이상일 경우, 지형인자에 따라 분포에 큰 차이를 보이고 있기 때문에 보다 정확한 용설 모의를 위해서는 시공간적 입력자료의 구축이 이루어져야 하겠다. 원격탐사 분야의 고해상도 인공위성 자료의 활용은 적설분포지역 추출 및 적설심의 공간분포 획득 등 다양한 측면에서 그 활용성이 대단히 높기 때문에 국내 북동부 산악지역의 용설 모의의 입력자료 구축의 대안으로 활용될 수 있을 것이다. 용설 모형의 매개변수 중 원격탐사기법을 활용하여 접근 추정 및 관측 할 수 있는 것은 적설심과 적설분포 면적으로 실상 장기유출 용설 모의 과정에서 적설분포와

적설심의 공간 분포는 용설 유출량의 정도를 평가하는 지수로써 사용될 수 있을 것이다.

5.1. 용설 모형의 추정 가능한 매개변수

(1) 적설심

NOAA/AVHRR 위성영상을 이용한 적설심 추출에 관한 연구는 국외에서 널리 수행되고 있다. 국내의 경우, 기상청의 지상기상관측소로부터 최심 적설심이 관측되고 있으며 이를 이용하여 GIS 자료를 구축함으로써 적설심의 공간적 분포를 추출 할 수 있다. RS 자료로부터 적설분포면적을 추출하여 구축된 GIS 자료를 중첩시킴으로써 적설심을 나타낼 수 있다(Fig. 3). 미계측 유역의 관측 자료로 활용되어 북동부 산악지역에서 지형적 영향을 제외한 인자로써 사용이 가능하다고 본다.

(2) 적설분포면적(Snow Cover Areas: SCA)

과거 적설분포면적 추출 및 모니터링은 원격탐사 기법을 적용하여 많은 연구 결과들이 있으며, 이는

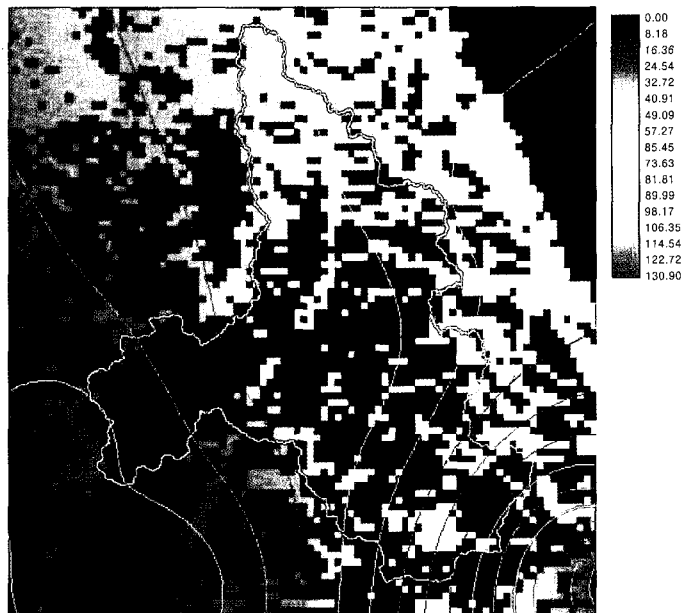


Fig. 3 Distribution snow depth from GIS data & SCA

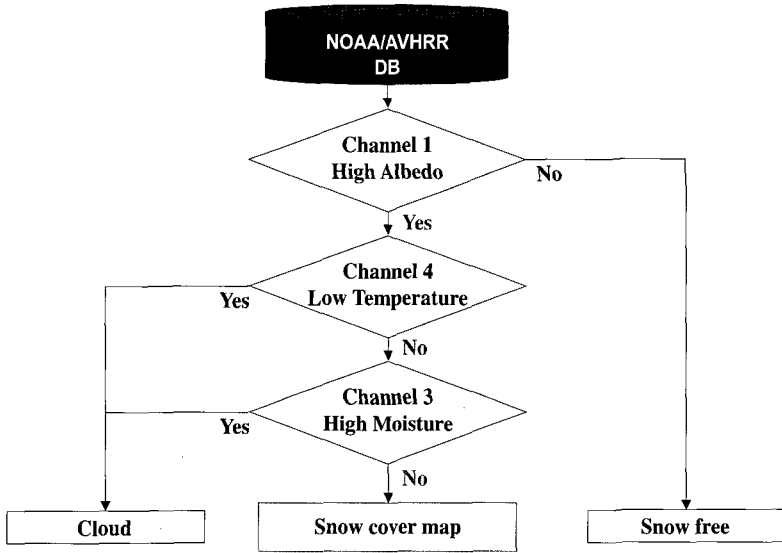


Fig. 4 Algorithm of classification SCA

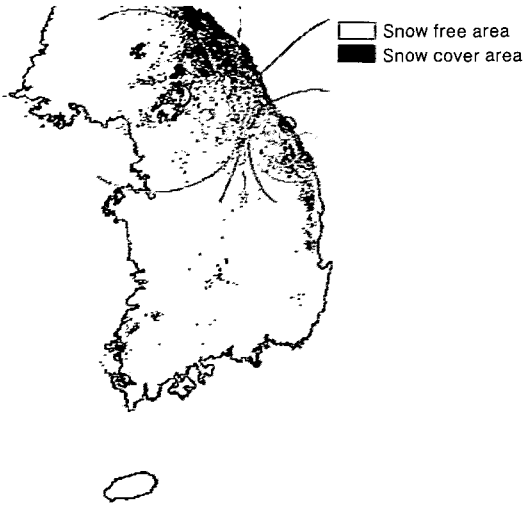


Fig. 5 Snow covered area(2002.12.10)

적설분포면적의 시계열 공간 자료를 획득하여 장기유출모형의 온도수계수를 선정하는데 중요한 자료로 사용된다. NOAA/AVHRR 위성영상을 이용하여 적설분포면적을 추출하는 알고리즘은 Fig. 4와 같다.

알베도로부터 강설이 없는 지역을 판가름한 후 높은 구름, 낮은 구름을 제거하여 적설분포지역을 추출하였다(Fig. 5). RS 자료를 활용한 적설분포면적 추

출에서 가장 중요한 인자는 각 채널별 눈, 얼음 및 구름을 구분하는 임계값의 추정이 가장 중요한 인자로 작용하게 된다. 임계값의 설정은 지점별 예민도분석과 파장별 경계범위의 정량화가 실험적으로 우선되어야 한다고 본다. 아직 국내의 RS, GIS를 이용한 미계측 유역의 융설관련인자 추출은 현장 관측자료와의 검증이 없는 이상 추출된 범위의 한계성을 가지고 있다. 또한, 산악지역의 경우 지형적 인자(고도, 경사, 경사향)에 따라 많은 변화가 내포되므로 적설분포지역 추정의 범위에 있어서 지속적인 관측자료가 필요할 것으로 판단된다.

6. 결론

우리나라의 겨울철 적설 및 봄철의 융설은 여름과 가을의 수자원 확보 및 홍수방재에 비하여 상대적으로 그 비중이 적다고 평가되어 거의 무시되어 왔다고 해도 과언이 아니다. 그러나 향후 기후변화에 따른 수자원 확보의 불확실성을 겨울철의 적설과 융설을 수자원화 한다는 차원에서 접근할 필요가 있으며, 이

에 대한 대비가 필수적이라고 생각된다. 기후변화와 관련하여 수자원의 장기적인 관리 및 계획 수립시 겨울철과 봄철의 수문유출의 해석을 위해서는 적설과 용설에 관한 기본 사항이 정립되어야 한다.

기후변화에 따른 국내의 용설 유출영향평가는 국외에 비하여 상당히 미흡한 실정이며 개념조차 생소할 수 있다. 또한, 적설이 발생하는 기간, 지형적 조건, 시기적 다양성 등이 국외와 매우 상이한 조건을 가지고 있으므로, 국내의 용설 영향을 평가하기 위해서는 지속적인 관측자료의 수집 및 미계측유역의 입력자료 추정의 다양한 접근방법 모색, 국내실정에 맞는 장기유출 모의방법의 선정 등이 가장 큰 조사항목에 포함될 것이다.

본 고에서는 현재 국내의 용설과 관련된 기존의 자료와 연구가 미흡하므로, NOAA 기상위성영상에 의한 적설분포를 추출하는 기법 그리고 지상 기상자료 및 GIS기법에 의한 적설심의 추정 등 광범위한 지역에서 발생하는 적설과 용설자료를 구축하는 방법을 제시하고, 이들 정보를 최대한 활용할 수 있는 장기수문모형을 제시하여, 지속가능한 수자원 개발뿐 아니라 기후변화에 능동적으로 대응하는 측면(용설에 의한 봄철 수자원 확보 및 폭설에 의한 피해 경감대책 수립)에서 미래 수자원 계획 수립시 적설 및 용설을 포함한 북동부 산악지역의 용설 영향평가가 이루어지기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 : 1-9-2)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 배덕효, 오재호(1998). "장기 유출해석에서의 용설영향에 관한 기초 연구." 한국수자원학회논문집, 제31권, 제6호, pp. 833-844.
- 이상호, 안태진, 윤병만, 심명필(2003). "적설 및 용설 모의를 포함한 탱크모형의 소양강댐 및 충주댐에 대한 적용." 한국수자원학회논문집, 제36권, 제5호, pp. 851-861.
- 진은진(2001). 도시화에 따른 수문환경의 변화분석에 관한 연구 : SCS 유출모형을 활용한 저류용량산정에 관하여. 석사학위논문, 서울대학교, pp. 3-6.
- 한국건설기술연구원(2000). 수자원계획의 최적화 연구(IV) : 기후변화에 따른 수자원계획의 영향평가, 건설교통부 IPD-2000-7.
- Albert J. B.(1998). Runoff from snowmelt. USACE, Engineer manual, 1110-2-1406.
- Anderson, E.A.(1973). National Weather Service River Forecast System-Snow Accumulation and Ablation Model. NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-17, U.S. Dept. Commerce, Silver Spring, MD.
- Daly, S.F., Davis, R., Ochs, E. and Pangburn, T.(2000). "An approach to spatially distributed snow modelling of the Sacramento and San Joaquin basins.", California, Hydrol. Process, Vol. 14, pp. 3257-3271.
- Day, G.N., Schaak, J.C. and Ellis, J.H.(1989). "A Direction Toward Improved Streamflow Forecasting in the Western Mountains.", in Proceedings, Western Snow Conference, pp. 79-89.
- Kazama, S.(1995). Study on Water Cycle in Middle Scale Region, Japan, Dept. Civil Engrg. Tohoku University.
- Kazama, S., Edamatsu, Y. and Sawamoto, M.(1992). "Time Variation of the Snow Area Detection Using NOAA/AVHRR." The Remote Sensing Soc., Japan, 12.4, pp.59-69.
- Kazama, S., Kawamura, H. and Sawamoto, M.(1992). "Snow Area Detection by Using

- AVHRR/NOAA.”, IGARSS 94 by IEEE, 4, pp.1830-1832.
- Kite, G.(2002). Manual for the SLURP hydrological model ver 12.2. Hydrologic-solutions.
- Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M. and Saindou, L.G.(1983). Precipitation-Runoff Modeling System. Users Manual, U.S. Geological Survey Water Resources Investigators Report B3-4238.
- Rango, A. and Martinec, J.(1994). “Model accuracy in snowmelt-runoff forecasts extending from 1 to 20 days.” AWRA, 30, pp. 463-470.
- Sugawara, M. Watanabe, L. Ozaki, E. and Katsuyama, Y.(1984). Tank model with snow component. Research Note of the National Research Centers for Disaster Prevention, 65, Japan.
- Vijay, P.S.(1995). Computer Models of Watershed Hydrology. water resources publication.
- William D. B.(1994). Flood-runoff analysis. USACE, Engineer manual, 1110-2-1417.