

# 동결기 자유수면 지하수의 모관상승량을 고려한 DAWAST 모형

## DAWAST Model Considering the Phreatic Evaporation in the Frozen Region

김 태 철\* · 박 철 동\*\*  
Kim, Tai Cheol · Zhedong Piao

### Abstract

The daily streamflow in the Yaluhe watershed located in the north-eastern part of China was simulated by DAWAST model and the water balance parameters of the model were calibrated by simplex method. Model verification tests were carried out. The range of root mean square error was 0.34~1.50mm, that of percent error in volume was -16.9~-62.0% and that of correlation coefficient was 0.727~0.920.

DAWAST model was revised to consider the phreatic evaporation from the ground water in the frozen soil by adjusting soil moisture content in the unsaturated layer at the end of the melting season. The results of estimation of the daily streamflow by the revised model were statistically improved, that is, the range of root mean square error was 0.31~1.49mm, that of percent error in volume was -11.7~-12.1%, and that of correlation coefficient was 0.810~0.932.

The accuracy of DAWAST model was improved and the applicability of DAWAST model was expanded to the frozen region.

### I. 서 론

하천 유역의 지속가능한 이수·치수사업을 위해서는 수자원의 합리적 계획, 설계 및 관리가 요구되고 있으며, 이를 위해서는 하천 유역에서의 일별 물 수지에 의한 일 유출량의 정확한 추정이 가장 기초적인 사항이다. 또한, 하천의 친수기능 확대와 수질오염 방지를 위해서는 수량과 수질을 동시에 고려하는 종합 해석이 바람직하며, 하천과 저수지에서 발생하는 부영양화현상과 조류발생 문

제를 해결하고 수질오염을 총량으로 규제하기 위해서도 일 유출량의 정확한 추정은 필수적이다.

이 연구에서는 DAWAST 모형(1992, 김)의 최적화 모형으로 中國 동북부 야루허(雅魯河)에서 유역 토양수분을 추적하여 일 유출량을 추정하였다.

그러나, DAWAST 모형에는 동결기(凍結期) 자유수면 지하수의 모관상승에 의한 불포화 토양층의 수분량 상승이 고려되어 있지 않아 아주 추운 지방에 적용하기에는 문제가 있다. 따라서, 동결기에 토양의 동결과정에서 자유수면 지하수의 모관

\*충남대학교 농과대학

\*\*中國 內蒙古自治區 扎蘭屯市 水利局

키워드 : 일유출량, 장기유출, 강우-유출

자유수면 지하수의 모관상승, 해빙기 용해

상승(일명, 淺層地下水 蒸發, Phreatic evaporation)에 의한 불포화 토양층의 수분 증가량을 해빙기에 용해(融解)로 반영하므로써 야루허 유역과 같이 추운 지방에서도 홍수유출과 일 유출량 해석이 보다 개선되었으며, DAWAST 모형의 정확성과 적용성이 확대되었다.

## II. 유역 및 수문자료

### 1. 유역 개요

분석대상 유역인 야루허 유역은 중국 동북부의 內蒙古自治區 呼倫貝爾盟에 소속되어 동경 121° 25' ~122° 52', 북위 47° 53' ~48° 52' 에 위치한다. 선정된 扎蘭屯(Zhalantun) 수문지점의 유역도는 Fig. 1, 지형인자는 Table 1 과 같다.

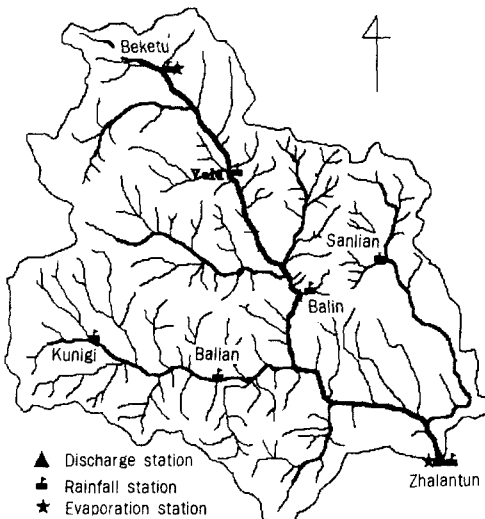


Fig. 1 Map of experimental watershed.

Table 1 Characteristics of experimental watershed

Station name	Watershed area (km <sup>2</sup> )	L (km)	Lc (km)	Perimeter of watershed (km)	Max. EL. (m)	Min. EL. (m)
Zhalantun	6,918	165.8	73.4	437.4	1,480	278

Notes : L is the length of the mainstream from outlet to divide.

Lc is the length of the mainstream from outlet to point closest to catchment centroid.

### 가. 지형적 특성

야루허 유역은 북, 북서쪽의 해발 1,200~500m에서 동남쪽의 500~280m까지 층계형으로 경사하여 점차 낮은 지형을 이루고 있다. 서부 및 서북부에는 산지가 발달하고 삼림이 밀집되어 있으며 동남부는 구릉지대로 지면의 경사는 완만하다. 유역내 수계는 대부분 북에서 동남으로 흐르고 하천망은 수지상을 형성하였으며 하곡은 비교적 발달되어 있다.

### 나. 기상학적 특성

유역내 연 평균기온은 -3.3~4.0°C로서 일 평균 최저기온은 1월의 -24.8~-17.4°C, 일 평균 최고기온은 7월의 16.2~22.7°C 이다. 연평균강수량은 404~511mm이며 강수량은 주로 6~9월에 집중되어 총강수량의 84%를 차지한다. 겨울철 토양의 최대 동결깊이는 연 평균 0.58~2.07m이며 하천의 결빙시기는 11월 17일~12월 4일 이고 해빙시기는 3월 30일~4월 24일로서 평균 하천동결일수는 122~153일 이다.

### 다. 토지이용현황

유역내에는 자연림, 초지가 각각 총 유역면적의 73.4%, 22.4%를 차지하고 밭, 마을, 도로 등이 4.2%를 차지하고 있다.

### 2. 수문자료

분석에 사용한 수문자료는 Table 2 와 같다. 1996년도는 Balian지점에서 4월 14일~20일의 강수현상이 Zhalantun, Kunniqi, Balin 등 인근 지점의 강수현상과 큰 차이가 있어 제외하였다.

Table 2 List of hydrologic and meteorologic data

Station name	Applied year	Rainfall stations	Evaporation stations
Zhalantun	1994~1995	Zhalantun, Balian, Beketu,	Zhalantun,
	1997~1998	Kunniqi, Yalu, Sanlian, Balin	Beketu

### III. 연구 이론

#### 1. DAWAST 모형의 기본원리

유역에 강우가 있으면 차단, 증발, 지표면 저류 등의 초기손실이 이루어지고, 강우가 계속되어 초기손실량 보다 크게 되면 침투와 함께 직접 유출이 일어난다.

한편, 불포화 토양층의 토양수분은 침투로 점차 증가하고, 침투가 계속되어 토양수분이 불포화층의 포장용수량을 초과하면, 중력에 의하여 하부 포화 토양층으로 심층침투가 이루어져 포화층의 토양수분도 증가된다. 포화층의 토양수분이 일정한 값 이상이면 불포화층과 포화층사이에서 중간 유출이 일어난다. 무 강수기에는 불포화층에서는 증발산에 의하여 토양수분이 감소하고, 포화층에서는 토양수분이 누출되어 기저유출로 나타난다.

이러한 강우-유출의 유역 수문반응을 Fig. 2 와 같이 개념화하였다.

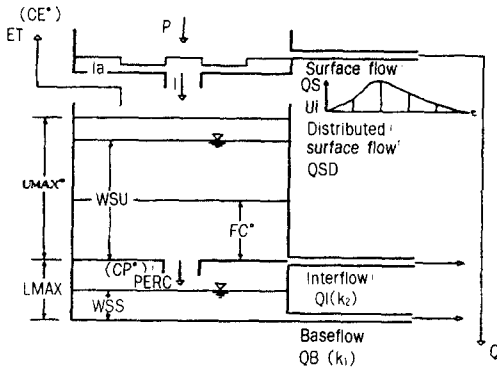


Fig. 2 Structure of the DAWAST model

#### 2. 동결기 자유수면 지하수의 모관상승

##### 가. 자유수면 지하수의 모관상승

자유수면 지하수의 모관상승(Phreatic evaporation)이란 지하수 깊이가 비교적 얇은 경우에 지하수가 상승하여 불포화층에 토양수분을 보급하는 것을 말한다.

비동결기 불포화층의 토양수분은 증발산으로 감

소하고 모관현상에 의하여 지하수의 상승 보급으로 증가한다. 자유수면 지하수의 모관상승량은 대기의 증발능력과 밀접한 관계가 있다.

동결기 토양은 동결되어 있으며 지온이 낮아 지표층 토양 증발은 아주 적게 된다. 이 경우 토양 하층 비동결 구역의 수분은 상층으로 보급되면서 동결 토양층으로 부단히 이동하여 저장된다. 따라서, 비동결기의 자유수면 지하수의 모관상승량은 증발산에 의해 소모되지만 동결기 자유수면 지하수의 모관상승량은 주로 불포화 토양층에 수분량으로 저장된다.

##### 나. 자유수면 지하수의 모관상승량 추정

동결기 토양의 자유수면 지하수의 모관상승에 영향을 미치는 인자는 주로 負積溫(Accumulated negative temperature, 연중 영하 일 평균기온의 합계)과 지하수위의 깊이이다. "토양동결 과정중 잠수증발 규율적 모의연구"(1999, 雷志棟)에 의하면 자유수면 지하수의 모관상승량은 부적온의 증가에 따라 증가하고 천층지하수위 깊이의 증가에 따라 지수형으로 감소하는 것으로 나타났다.

$$E = P \cdot ST^{1/2} = a_1 \exp(-b_1 H) \cdot ST^{1/2}$$

여기서, E : 동결기 자유수면 지하수의 모관상승량(mm), P : 동결기 자유수면 지하수의 모관상승계수, ST : 부적온(°C), H : 지하수 깊이(m), a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub> : 모관상승계수와 지하수위와의 관계를 나타내는 계수로 여기에서는 a<sub>1</sub> = 18.0 mm°C<sup>1/2</sup>, b<sub>1</sub> = 1.0 m<sup>-1</sup> 적용함.

### IV. 결과 및 고찰

DAWAST 모형의 최적화 모형을 扎蘭屯 지점에 적용하여 보정과 검정을 하였으며, 야루허 유역의 동결기 자유수면 지하수의 모관상승량을 고려하여 모형을 수정하였다.

#### 1. DAWAST 모형의 보정

##### 가. 물 수지 매개변수의 보정

DAWAST 모형의 최적화 모형을 대상 수문지

Table 3 Optimal parameters in the Zhalantun watershed

Calibration period	Verification period	$U_{max}$ (mm)	$L_{max}$ (mm)	FC (mm)	CP	CE
1997~1998	1994~1995	404	39	104	0.018	0.003

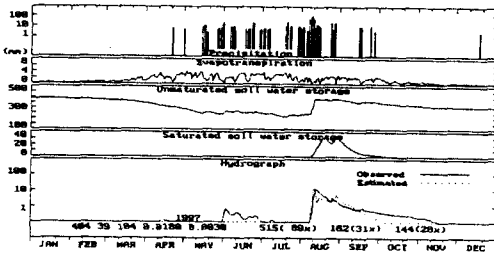


Fig. 3 Diagram of hydrologic responses in the calibration period of 1997

점에 적용하여 물 수지 매개변수를 보정한 결과는 Table 3 과 같다.

나. 보정기간 수문곡선

보정된 물 수지 매개변수 값을 보정기간에 모의 발생시켜 관측-추정 일 유출량 수문곡선을 비교한 결과 Fig. 3~4 과 같다.

보정기간의 추정된 수문곡선을 검토한 결과, 1997년에는 6월의 작은 양의 유출 변화에는 반응을 나타내지 않았지만 8월의 홍수 유출에는 잘 일치하였다. 1998년에는 홍수기전 6월의 유출에는 반응이 없었고 7월의 홍수초기에 작게 추정되었지만 대체로 잘 일치하였다. 1997년 1~7월, 10~12월과 1998년 1~6월, 10~12월은 장기간 강수가 적어 갈수 유출을 나타내고 있다. 1997~1998년 4월의 유출은 겨울철에 내린 눈과 얼음이 녹으면서 생성된 유출로 판단된다.

다. 보정기간 유출량 검토

보정기간의 관측-추정 일별 유출량 검토결과는 Table 4 와 같다. 상관계수  $r$  는 0.920로 양호한 값을, RMSE(Root Mean Square Error) 오차는

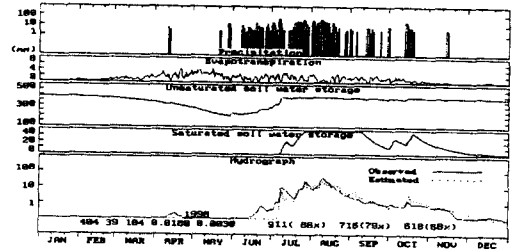


Fig. 4 Diagram of hydrologic responses in the calibration period of 1998

Table 4 Comparison of equal value line of daily flow depth in calibration period

Calibration period	RMSE (mm)	$r$	PEV (%)
1997~1998	1.50	0.920	-16.9

1.50mm, PEV(Percent Error in Volume) 오차는 -16.9%의 값을 나타내고 있다.

2. DAWAST모형의 검정

가. 검정기간 수문곡선

검정기간(1994~1995)의 관측-추정 일 유출량 수문곡선은 Fig. 5, 6과 같다.

검정기간의 추정된 수문곡선을 검토한 결과, 1994년의 경우, 7~9월의 유출 변화에는 반응을 보이지 않고 10월에 가서 유출반응을 나타내었다. 1995년에는 6월의 홍수 유출에 반응이 늦는 현상

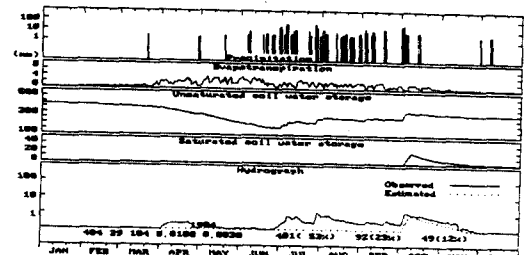


Fig. 5 Diagram of hydrologic responses in the verification period of 1994

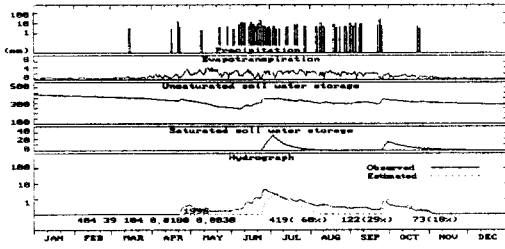


Fig. 6 Diagram of hydrologic responses in the verification period of 1995

을 보이는데 이는 불포화층 토양수분의 추정치가 실제 유역의 토양수분상황을 과소 평가하였음을 의미한다.

나. 검정기간 유출량 검토

검정기간 관측-추정 일별 유출량 검토결과를 Table 5 와 같다. 이 가운데 PEV 오차는 -62.0% 로서 큰 값을 나타내었다.

Table 5 Comparison of equal value line of daily flow depth in the verification period

Station	Period	RMSE (mm)	r	PEV (%)
Zhalantun	1994~1995	0.34	0.727	-62.0

3. 야루허 유역 동결기 자유수면 지하수의 모관상승량 추정

1993~1998년의 기상자료와 동결기 자유수면 지하수의 모관상승량 산정식을 적용하여 야루허 유역의 동결시기 지하수위 깊이를 고려하여 계산된

Table 6 Calculation of phreatic evaporation in freezing period in the Yaluhe watershed

Year	ST (°C)	H (m)	E (mm)	Remark
1994	-1936	2.3	79.4	ST : Average accumulated negative temperature from Oct. 23~31 to Apr. 2~15.
1995	-1962	2.4	72.3	
1997	-2266	3.0	42.7	
1998	-1994	3.0	40.0	

자유수면 지하수의 모관상승량은 Table 6 과 같다.

4. 동결기 토양수분 변화특성을 고려한 DAWAST 모형

가. 동결기 자유수면 지하수의 모관상승량을 고려한 DAWAST 모형의 수문곡선

동결기 자유수면 지하수의 모관상승 이론에 따르면 이 유역에서 동결기에는 자유수면 지하수의 모관상승에 의하여 불포화층 토양수분량(WSU)은 일정량 증가하게 된다. DAWAST 모형에는 동결기 자유수면 지하수의 모관상승량에 의한 불포화 토양층의 수분량 상승이 고려되어 있지 않다. 따라서 동결된 토양이 모두 해동되면, 불포화층 토양수분량의 실제 값은 모형에 의한 추정치보다 큰 값을 나타낼 것으로 판단된다. 이 유역에서는 완전 해동후 유역수문반응이 DAWAST모형의 기본 원리를 준수하므로 평균기온이 0°C 이상인 4월 중·하순부터 해동하기 시작하여 5월 31일까지 완전 해동되는 것으로 보고 연도별로 6월 1일부터는 WSU 값을 모형의 추정치보다 Table 6 에서 추정 한 자유수면 지하수의 모관상승량만큼 상향 조정하여 모의 발생한 결과, Fig. 7~10과 같이 홍수유출량 추정이 크게 개선되었다. Fig. 7~10에서 oq 는 관측 일유출량, eq 는 추정 일유출량을 나타낸다.

동결기 자유수면 지하수의 모관상승량을 WSU 값에 조정하기 전·후의 수문곡선을 검토한 결과, 1994~1995년에 조정후 관측-추정 일 유출량 수문곡선이 홍수유출을 보다 정확하게 모의 발생하였

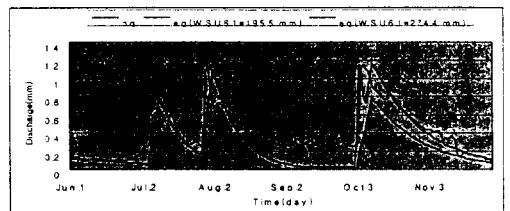


Fig. 7 Hydrograph before and after adjusting the WSU in 1994

Table 7 Adjusted WSU after considering the phreatic evaporation during flood season

Year	WSU <sub>(6,1)</sub> (mm)			RMSE		PEV (%)		Flood season
	Original	Phreatic evaporation	Adjusted	Original	Adjusted	Original	Adjusted	
1994	195.5	79.4	274.9	0.34	0.16	-71.9	-18.4	Jun.1~Sep.30
1995	255.3	72.3	327.6	0.65	0.64	-45.6	8.9	Jun.1~Sep.30
1997	202.3	42.7	245.0	1.53	1.37	-23.5	-9.5	Jun.1~Sep.30
1998	226.7	40.0	266.7	3.41	3.30	-12.6	-9.0	Jun.1~Sep.30

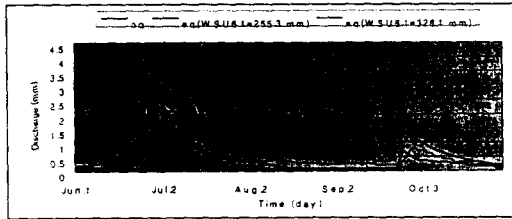


Fig. 8 Hydrograph before and after adjusting the WSU in 1995

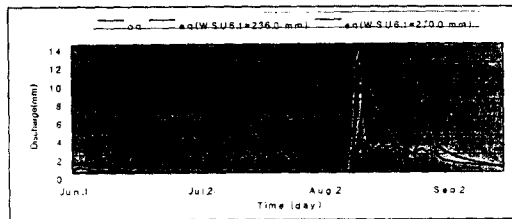


Fig. 9 Hydrograph before and after adjusting the WSU in 1997

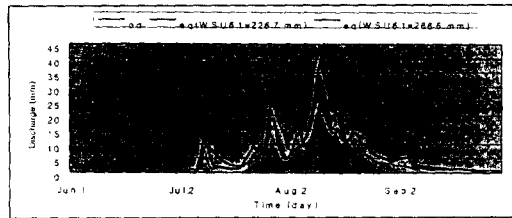


Fig. 10 Hydrograph before and after adjusting the WSU in 1998

다. 1997~1998년에는 WSU 값 조정후 홍수기 시작초기 7~8월에 일 유출량이 조정전보다 관측치에 잘 접근하는 좋은 반응을 나타내었다.

나. 동결기 자유수면 지하수의 모관상승량을 고려한 DAWAST 모형의 유출량 검토

홍수기간(6월 1일~9월30일)의 연도별 동결기 자유수면 지하수의 모관상승량과 이를 WSU에 조정하기 전·후의 관측-추정 일 유출량 분석결과는 Table 7 과 같다.

모형의 적합도 기준인 RMSE 오차의 감소치는 작게 나타났으나 유출용적의 Percent 오차인 PEV의 절대치는 크게 감소되었다. 이는 DAWAST 모형에 동결지역에서의 해빙기에 자유수면 지하수의 모관상승량을 불포화층 토양수분량(WSU)에 반영하므로써 홍수기 유출해석이 크게 향상되었으며, 모형의 적용성이 확대, 개선되었음을 의미한다.

동결지역에서의 해빙기에 자유수면 지하수의 모관상승량을 불포화층 토양수분량(WSU)에 반영하여 전기간 扎蘭屯 지점의 관측-추정 일 유출량의 통계분석 성과는 Table 8과 같이 개선되었다.

Table 8 Statistical results after considering the phreatic evaporation during full season

Station	Period	RMSE (mm)	r	PEV(%)
Zhalantun	1994~1995	0.31	0.810	-12.1
	1997~1998	1.49	0.932	-11.7

## V. 결 론

DAWAST 모형의 최적화 모형을 야루허 유역 扎蘭屯 지점에 적용하여 일 유출량을 추정하였다.

DAWAST 모형에는 동결기 자유수면 지하수의 모관상승량에 의한 불포화 토양층의 수분량 상승이 고려되어 있지 않아 추운 지방에 용해를 해석하는데 문제가 있었다. 따라서, 동결기(凍結期)에 토양의 동결과정에서 자유수면 지하수의 모관상승(Phreatic evaporation)에 의한 불포화 토양층의 수분변화량을 고려하여 해빙기에 반영하므로써 야루허 유역과 같은 추운 지방에서 홍수해석과 일유출량 해석이 보다 개선되었으며, DAWAST 모형의 정확성과 적용성이 확대되었다.

1. DAWAST 모형의 보정 및 검정기간에 관측 및 추정 일별 유출량을 검토한 결과, Root mean square error는 0.34~1.50mm, Percent error in volume는 -16.9~-62.0%, 상관계수  $r$  는 0.727~0.920의 값을 나타내었다.

2. 동결시기 자유수면 지하수의 모관상승에 의한 토양수분 변화특성을 고려하여 불포화층 토양수분량(WSU)에 반영하여 DAWAST 모형을 운행한 결과, 보정 및 검정기간에 관측 및 추정 일별 유출량의 Root mean square error는 0.31~1.49mm, Percent error in volume는 -11.7~-12.1%, 상관계수  $r$  는 0.810~0.932의 값으로 개선되었다.

## 참 고 문 헌

1. 김태철, 노재경, 1991, 유역토양 수분추적에 의한 유출모형, 한국농공학회지 33(4), pp.61-72
2. 한국건설기술연구원, 1992, 수문모형 평가에 관한 연구
3. 김태철, 1992, 한국 하천의 일 유출모형 구조와 사용지침, 충남대학교 농업과학연구소
4. 김태철, 문종필, 1995, 유역토양수분 추적에 의한 실시간 홍수예측모형, 한국농공학회지 37(7), pp.81-89
5. 박승기, 김태철, 1996, 한국하천의 일유출량 모형, 한국수자원학회지 29(5), pp.223-234
6. 김태철, 1997, DAWAST모형을 이용한 유출곡선번호 추정, 한국수자원학회지 30(5), pp.423-429
7. 成都科技大學, 華東水利學院, 武漢水利電力學院(合編), 1981, 工程水文及水利計算, 水利電力出版社(中國)
8. 雷志棟, 尙松浩, 楊詩秀, 王義, 趙冬梅, 1999, 土壤凍結過程中潛水蒸發規律的模擬研究, 水利學報(中國) <http://www.chinainfo.gov.cn/periodical/slxbslxbs99/slxbs9906/990602.html>
9. 內蒙古水利科學研究所, 1993, 雅魯河流域規劃(中國)