

SWAT 모형의 적용을 위한 적정 강우계밀도의 추정

Optimal Rain Gauge Density and Sub-basin Size for SWAT Model Application

유철상* / 김경준** / 김남원***

Yoo, Chulsang / Kim, Kyoungjun / Kim, Nam-Won

Abstract

This study estimated the optimal rain gauge density and sub-basin size for the application of a daily rainfall-runoff analysis model called SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Simulated rainfall data using a WGR multi-dimensional precipitation model (Waymire et al., 1984) were applied to SWAT for runoff estimation, and then the runoff error was analyzed with respect to various rain gauge density and sub-basin size. As results of the study, we could find that the optimal sub-basin size and the representative area of one rain gauge are similar to be about 80km² for the Yong-Dam dam basin.

keywords : SWAT, WGR model, optimal rain gauge density, optimal sub-basin area

요 지

본 연구에서는 준분포형 장기유출 모형인 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)을 적용하는 경우 유출 결과의 정도를 확보하기 위한 강우계 밀도 및 소유역의 규모를 파악하였다. 다차원 강우모형인 WGR모형(Waymire 등, 1984)에 의하여 모의 발생된 강우를 SWAT모형을 통하여 유출해석한 후 다양한 소유역 규모 및 강우계 밀도에 대해 유출 오차를 분석하는 방법을 사용하였으며, 연구결과 대상유역인 용담댐 유역의 경우 적정 소유역의 평균면적 및 강우계 1개가 대표하는 면적의 적정규모는 모두 80km²로 파악되었다.

핵심용어 : SWAT, WGR모형, 적정 강우계 밀도, 적정 소유역 규모

1. 서 론

SWAT (Soil and Water Assesment Tool) 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 유역유출모형이다. 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 고려가 가능하고, 토지관리 방법의 영향예측 또한 가능한 모형이다(Neitsch 등, 2001).

이 모형은 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준분포형 장기 강우-유출모형으로서 4가지의 부모형(sub model)으로 구성되어 있다. 각 부모형은 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적 등으로 구분된다. 또한 한 유역에서의 다양한 물리적 과정을 모의할 수 있으며 모형화를 위하여 유역을 수 개의 소유역으로 구분할 수 있다. 그리고 이렇게 구분된 소유역을 동일한 특성을 가진 HRU(Hydrologic Response Unit)로 세분하여 유출량을 산정한다(장철희 등, 2003; 장대원 등, 2003). 그러나 SWAT 모형은 분할된 소유역의 대표 강우량으로

* 정희원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 부교수 (e-mail: envchul@korea.ac.kr)

** 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (e-mail: guitar77@korea.ac.kr)

*** 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원 (e-mail: nwkim@kict.re.kr)

소유역 중심점에서 가장 근접한 1개의 강우자료를 적용한다는 단점을 가지고 있다. 따라서 강우계 밀도가 낮은 경우 소유역을 자세히 분할하더라도 강우의 공간적 변동성을 자세히 고려하는 데는 한계가 있다.

이러한 모형의 국내 적용은 농업토목분야, 기상분야, 수자원분야 등에서 몇 차례 찾아볼 수 있으나(권명준 등, 2003; 이현 등, 1999a; 이현 등, 1999b; 임상준 등, 2003; 황하선과 윤춘경, 2002), 그 적용상 문제점이 폭넓게 검토된 바는 아직 없다. 특히 국내의 가용자료수준을 고려한 검토는 아직까지 미진한 상황이다. 매개변수 추정에 결정적 영향을 미치는 이러한 문제는 모형 자체의 문제가 아닌 그 적용상의 문제이다. 본 연구에서는 SWAT 모형의 적용 시 발생할 수 있는 여러 문제점 중 강우계 밀도와 소유역의 규모 또는 HRU의 크기에 따라 유출해석 결과가 어떻게 달라지는지를 검토하고자 한다.

본 연구의 목적과 유사한 내용의 연구로서 권명준과 권순국(1998)의 연구 및 김경택과 최윤석(2003)의 연구를 살펴볼 수 있다. 특히, 권명준과 권순국(1998) 연구에서는 SWAT의 모형을 복하천 유역에 대해 적용하여 실측 유출과 모의 유출을 비교함으로써 최적의 HRU 개수를 추정하였다. 그러나, 고려한 경우의 수가 3가지이고, 아울러 실측치와 모의치의 상관계수가 모두 0.8 이상으로 유의한 차이라고 단정하기 어려운 한계가 있다. 상대적으로 작은 규모의 유역이라는 한계 또한 생각할 수 있다.

본 연구에서는 용담댐 유역을 대상으로 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 다양한 형태의 강우를 고려하기 위해 WGR (Waymire 등, 1984)모형을 이용하여 시간과 공간의 다차원으로 모의된 강우를 이용하였으며, 다양한 소유역의 규모 및 강우계 밀도에 대한 SWAT모형의 유출 결과를 분석함으로써 적절한 소유역의 규모 및 강우계 밀도를 유추할 수 있도록 하였다.

2. 대상유역 및 입력자료의 구성

2.1 대상유역

본 연구에서는 금강유역 내 용담댐 유역을 대상유역으로 선정하였다. 용담댐 유역은 북위 36°00′ ~ 35°35′, 동경 127°20′ ~ 127°45′에 해당하는 금강유역의 최상류지역에 위치한다. 유역면적은 930km²로 금강유역면적 9,886km²의 약 9.45%를 점유하고 있다. 토지 이용상황은 농경지 13.6%, 임야 79.1%, 기타 7.3%로 구성된다. 따라서 유역의 대부분 임야지역인 산악지대

로 분류되고, 농경지는 수계를 따라서 분포한다(장철희 등, 2003).

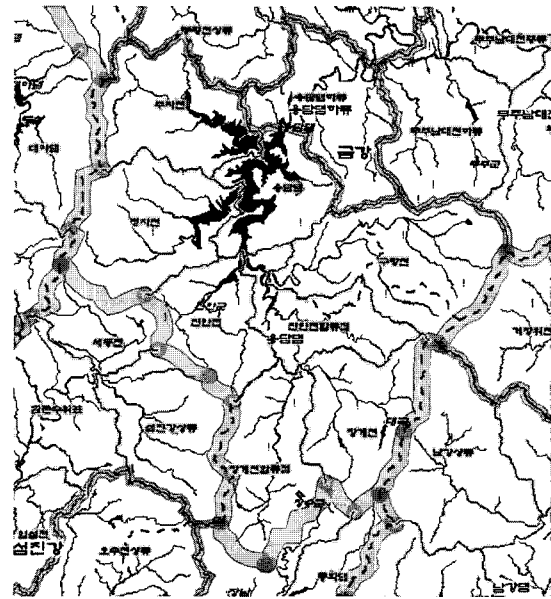


그림 1. 대상유역

2.2 입력자료의 구성

SWAT 모형을 이용하여 유출 모의를 하기 위해서는 강우, 온도, 풍속, 태양복사량 그리고 상대습도 같은 수문 자료가 필요하다.

(1) 강우자료(Precipitation)

본 연구에 사용된 강우자료는 다차원 강우모형인 WGR 모형(Waymire 등, 1984)을 이용하여 모의 발생시켰다. WGR 모형은 중규모 강우(호우범위 20~200 km)를 표현하기 위해 개발된 모형으로, 국내에서도 김상단 등(2000), 정광식 등(2001)의 연구에 이용된 바 있다. 이 모형은 개념적인 모형으로서 중규모 강우의 대기 동역학적 특성과 강우의 통계학적 특성이 비교적 잘 반영된 모형으로 강우의 시공간 표현으로서 호우 사상의 도달 메커니즘에 의해 시간적으로 특성화되어진다. 또한, 클러스터 포텐셜 중심 속에 포함되어있는 강우세포의 생성 및 소멸로서 강우를 표현한다. 이 때 클러스터 포텐셜 중심은 다시 호우전선 속에 포함되어있다. 호우전선의 도달 구조는 포아슨 과정에 의해 나타나게 되며 호우전선 내의 클러스터 포텐셜을 분포시키기 위하여 공간적 포아슨 과정이 적용된다. 아울러 강우의 군집특성 및 이송·확산에 의한 시간·공간적인 변화도 잘 고려하고 있는 것으로 알려져 있다(김상단 등, 2000). 이와 같은 WGR 모형의 주요 매개변수는 다음 표 1과 같다.

표 1. WGR강우모형의 매개변수

매개변수	매개변수에 대한 설명
λ_M	호우전선 도달율 (bands/hr)
ρ_L	클러스터 포텐셜 밀도 (clusters/km)
$E[v]$	클러스터에 포함된 평균 강우세포 개수 (cells)
β	강우세포 생성율 (cells/hr)
σ	클러스터 내 강우세포 위치변수 (km)
α	강우세포 지속기간에 관한 변수 (/hr)
D	강우세포의 공간적 지배반경 (km)
$E[i_o]$	강우세포 발생 시 평균강우강도 (mm/hr)
U_b	호우속도 (km/hr)

김상단 등(2000)은 용담댐 유역의 자료를 이용하여 WGR 모형의 매개변수를 추정하여 다차원 강우모형의 시간적인 특성을 연구한 바 있다. 본 연구에서는 김상단 등(2000)이 추정한 용담댐 유역의 매개변수 중 강우의 우리나라의 강우 특성을 비교적 잘 나타낸 것이라 판단되는 매개변수를 각 월별로 하나씩 선정하였다(표 2). 본 연구에서는 WGR 모형을 이용하여 83×101의 격자형태로 일 강우를 모의하였다(그림 2). 그리고 각각의 격자에 해당하는 자료를 강우관측소의 강우자료로 가정하여 총

8,383개의 강우자료를 생성하였다. 모의된 강우자료의 월별평균을 공간 분포시켜 나타내면 그림 3과 같다.

(2) 그 밖의 기상자료

강우자료를 제외한 나머지 기상자료(온도, 풍속, 태양 복사량, 상대습도)에 대해서는 거창관측소의 기상자료를 이용하여 SWAT 모형에서 직접 모의발생시켰다. SWAT 모형에서 기상자료를 모의시키기 위해서는 .wgn file에 기상자료에 대한 매개변수를 입력해야 하며, 본 연구에서 사용된 매개변수는 표 3과 같다.

표 2. 강우 모의에 사용된 월별 매개변수

월	λ_M (bands/hr)	ρ_L (clusters/km)	α (km)	β (cells/hr)	$E[i_o]$ (mm/hr)	$E[v]$ (cells)	SSQ*
6월	0.0048	0.0047	0.9797	0.2920	49.1063	6.0781	0.2151
7월	0.0085	0.0096	1.3172	0.2920	56.6062	3.2656	0.0807
8월	0.0085	0.0068	1.3172	2.9836	40.6688	4.6719	0.0522
9월	0.0025	0.0047	0.7688	0.6196	45.8250	4.8125	0.2396

* SSQ(Residual Sum of Square, Sum of Square Error)

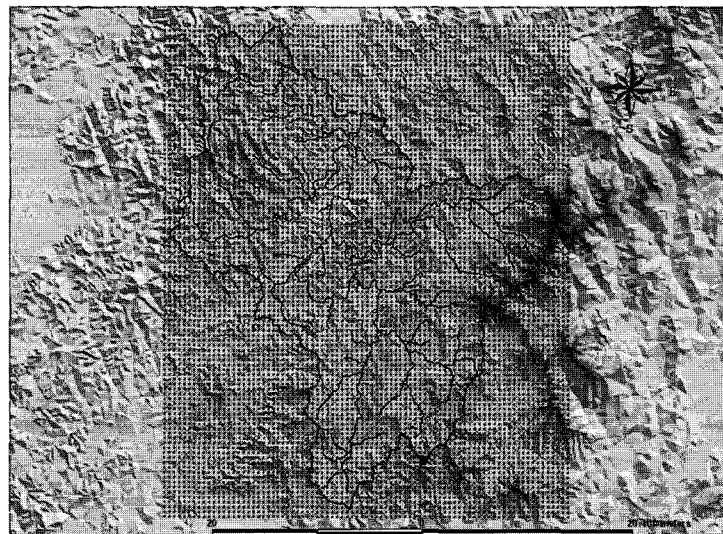


그림 2. 다차원 강우모의를 위한 격자구조

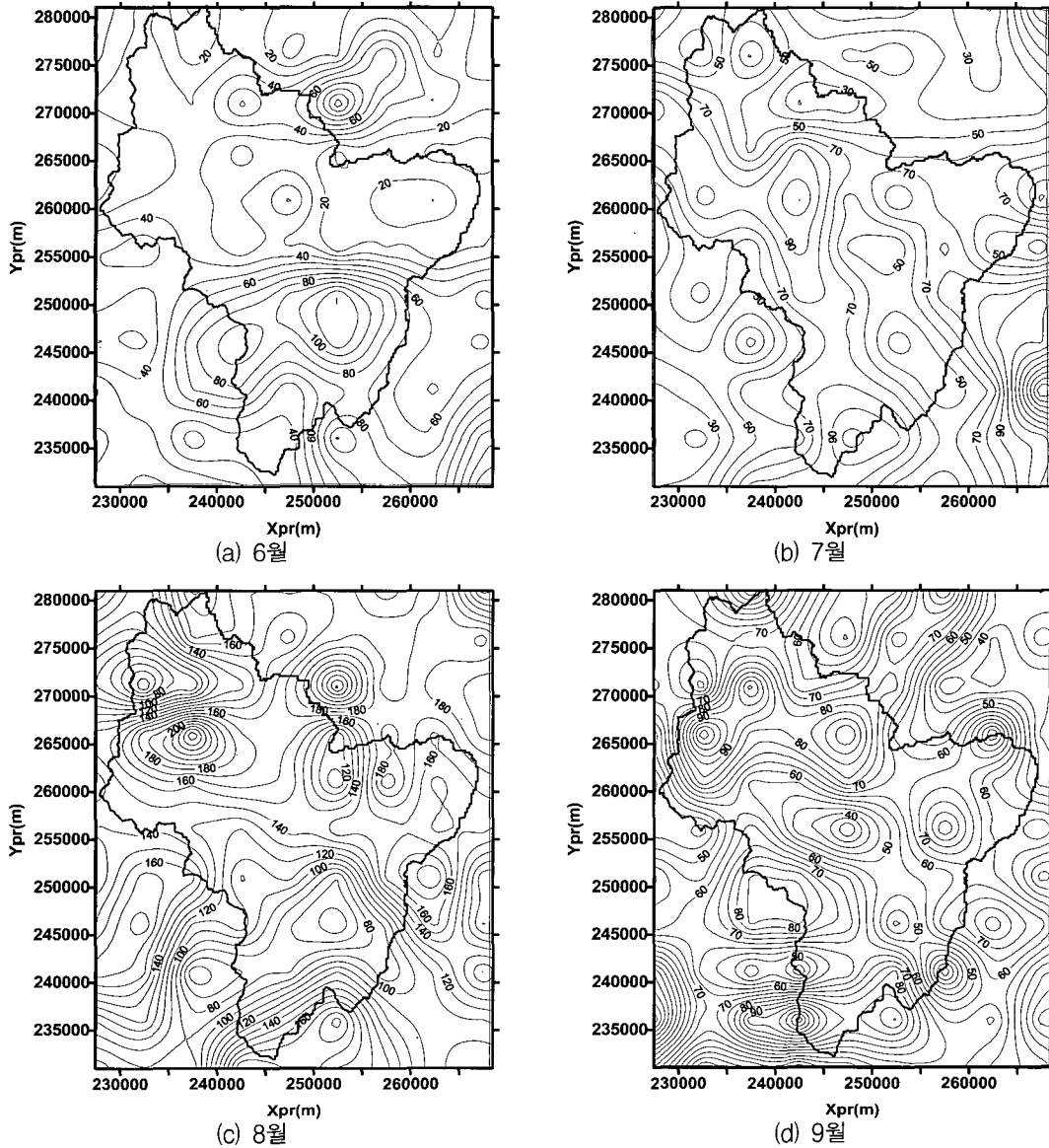


그림 3. 모의된 월별 강우분포

표 3. 기상자료 모의발생에 이용된 매개변수

매개변수	설 명	월			
		6	7	8	9
TMPMX	월별 평균 일 최고 기온(°C)	27.43	30.19	30.89	26.35
TMPMN	월별 평균 일 최저 기온(°C)	17.45	22.31	22.21	16.44
TMPSTDMX	월별 일 최고 기온의 표준편차(°C)	2.89	3.40	2.78	2.90
TMPSTDMN	월별 일 최저 기온의 표준편차(°C)	2.52	2.52	2.17	3.68
PCPMM	평균 총 월별 강우(mm H ₂ O)	152.12	282.56	245.60	134.05
PCPSTD	월별 일강우의 표준편차(mm H ₂ O/day)	15.10	21.28	16.90	12.00
PCPSKW	월별 일강우의 왜곡도 계수	3.07	2.62	2.81	3.42
PR_W1	월별 무강우일-강우일 확률	0.33	0.34	0.35	0.36
PR_W2	월별 강우일-강우일 확률	0.67	0.63	0.71	0.76
PCPD	월별 평균 강우일수	15.00	14.85	16.95	18.00
RAINHHMX	월별 전체 기록기간에 최대 0.5시간 강우(mm H ₂ O)	10.40	10.40	15.50	12.70
SOLARAV	월별 평균 일 태양복사량(MJ/m ² /day)	15.80	14.10	14.50	12.90
DEWPT	월별 평균 일이슬점온도(°C)	4.21	7.10	7.66	6.43
WNDVAV	월별 평균 일 풍속(m/s)	1.42	1.51	1.37	1.17

3. 유출모의 및 오차해석

3.1 소유역의 규모(수)에 따른 유출의 변화양상

(1) 소유역의 분할

본 연구에서는 소유역의 수를 1개, 2개, 5개, 8개, 43개, 56개, 83개, 111개로 변화시켜 유출모의를 수행하였다. Threshold area는 500 ha로 하였으며, 입력자료로 사용된 강우관측소의 수는 8,383개이다. 그림 4는 소유역의 수에 따른 소유역의 변화양상의 예를 나타낸 것이며, 표 4는 소유역 수에 따른 HRU의 수, 소유역의 면적 및 HRU의 면적을 정리한 것이다.

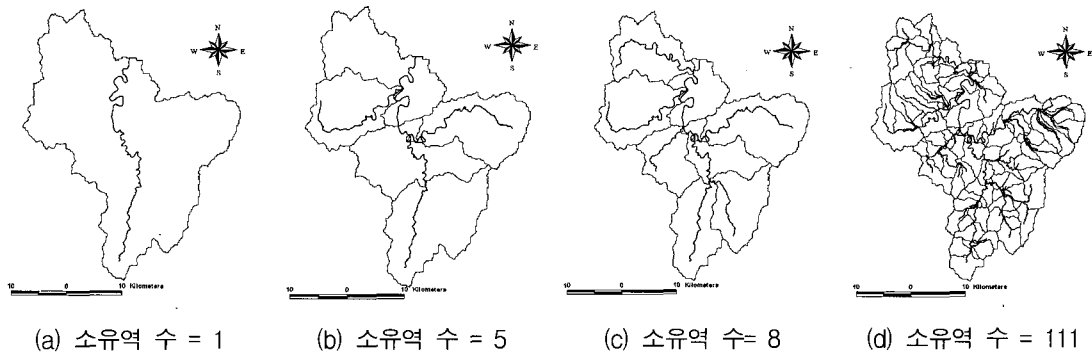


그림 4. 소유역 수에 따른 유역 분할의 형태

표 4. 소유역 분할수에 따른 평균 소유역면적과 평균 HRU의 면적

소유역의수	1	2	5	8	43	65	83	111
HRU의 수	4	5	17	28	115	170	218	287
평균 소유역 면적(km ²)	922.03	461.01	184.41	115.25	21.44	14.18	11.10	8.31
평균 HRU 면적(km ²)	230.51	461.01	54.24	32.93	8.02	5.42	4.23	3.21

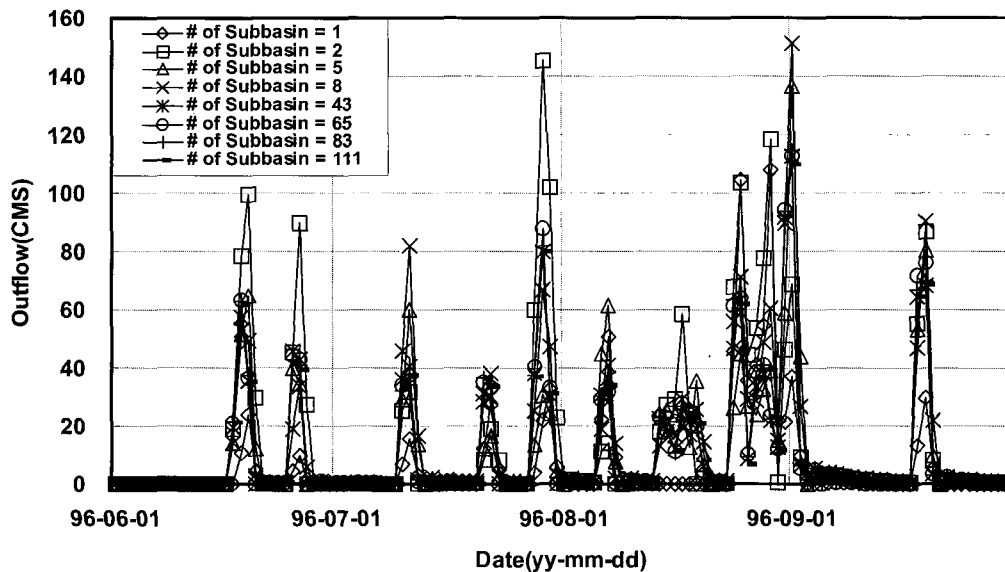


그림 5. 소유역의 수에 따른 유출량의 변화 비교

(2) 유출 모의 결과 및 유출오차

소유역 수에 변화를 주어 표 4와 같은 여덟 가지 경우에 대하여 유출해석을 실시하고, 그 결과를 아래 그림 5와 같이 비교하였다. 소유역의 수가 111개일 때가 본 연구의 경우 가장 정확한 경우이다. 따라서, 이때의 유출량을 참값으로 가정하고, 나머지 7가지 경우에 있어서 유출량에 대한 RMSE(Root Mean Square Error)를 추정하였다. 그 결과를 HRU에 대해 정리한 것이 표 5 및 그림 6이다. 그림 6에서 살펴볼 수 있듯이 소유역의 수와 HRU의 수가 증가함에 따라 RMSE는 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타낸다.

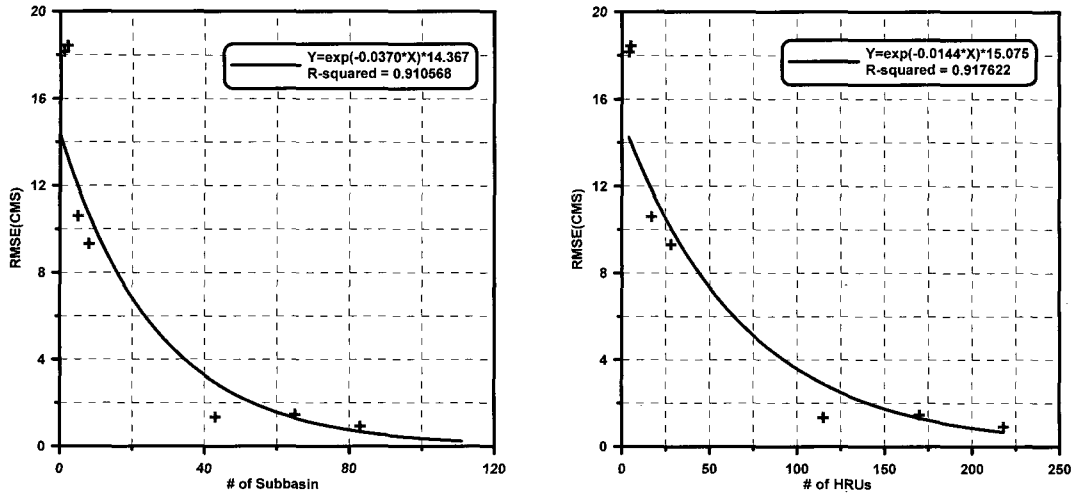


그림 6. 소유역의 개수(좌), HRU개수(우)와 RMSE와의 관계

표 5. 소유역 개수별 RMSE

소유역 개수	HRU 개수	HRU의 평균면적	RMSE(CMS)	RMSE 백분율(%)
1	4	230.51	18.16	76
2	5	461.01	18.44	78
5	17	54.24	10.60	45
8	28	32.93	9.33	39
43	115	8.02	1.34	6
65	170	5.42	1.46	6
83	218	4.23	0.91	4

(3) 최적 소유역 및 HRU 수의 추정

그림 6의 결과에서도 알 수 있듯이 소유역의 수와 HRU의 수와 RMSE 사이의 관계는 지수함수를 잘 따르고 있다. 이를 바탕으로 Nyquist의 샘플링 이론(Chatfield, 1989)에 근거하여 허용 가능한 최소 소유역의 수 및 최소 HRU의 수를 추정하여 보았다. Nyquist에 의하면, 오차의 거동이 지수함수를 따르는 경우 최적(최소)의 값은 오차의 상대비가 e^{-1} 에 해당하는 경우로 결정된다.

위에서 구해진 소유역의 수, HRU의 수와 RMSE 백분율 자료를 Y 절편을 1로 하여 회귀분석하여 나타내면 각각 그림 7, 8과 같다. 이 회귀식을 이용하여 RMSE 백분율이 e^{-1} 에 해당하는 소유역의 수와 HRU의 수를 찾으면, 적정 소유역의 개수는 12 ~ 13 개, 적정 HRU의 수는 58 ~ 59 개로 추정된다. 참고로, 이러한 결과는 강우계의 수가 소유역의 수보다 많은 경우로 제한된다. 이것은 SWAT모형의 특성상 강우계의 수가 제한적인 경우 강우계의 수보다 소유역을 많이 나누는 것은 의미가 없기 때문이다.

3.2 강우계 밀도의 변화에 따른 유출의 변화양상

강우자료의 격자를 하나의 강우관측소로 본다면, 총 8,383개의 강우관측소의 자료가 구축된다. 이것은 약 4 개/ km^2 의 강우계밀도가 된다. 본 연구에서는 111개로 소유역 분할을 한 후 8,383개의 강우관측소의 자료를 모두 사용한 경우 모의된 유출량을 참값으로 가정하고 강우관측소의 수를 줄여 가면서 모의된 자료의 유출량을 계산하여 그 오차를 추정하였다.

(1) 강우계 밀도의 변화

강우계의 분포는 공간적으로 균등한 것이 일반적이므로, 본 연구에서와 같은 경우에는 강우계의 분포를 격자형태로 분포시키는 것이 타당하다. SWAT 모형을 적용하는데 있어서 사용되어질 강우계의 수를 표 6과 같이 변화시켜가며 유출모의를 실시하였다. 그림 9는 강우계의 수가 1, 2, 4, 16개인 경우의 강우계를 추출하는 방법을 보여준다. 강우계는 유역 내 격자형태로 분포되도록 조정하였다.

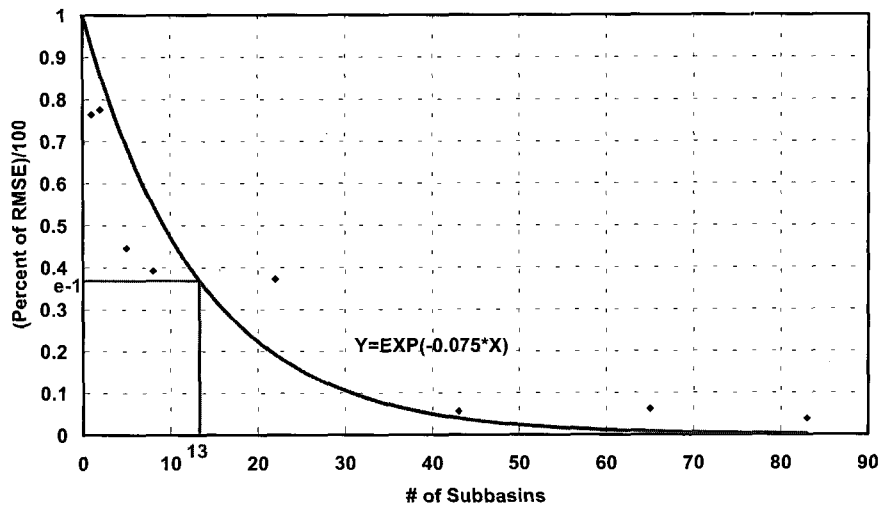


그림 7. 오차의 거동을 지수함수로 가정하는 경우 최적 소유역 개수의 추정

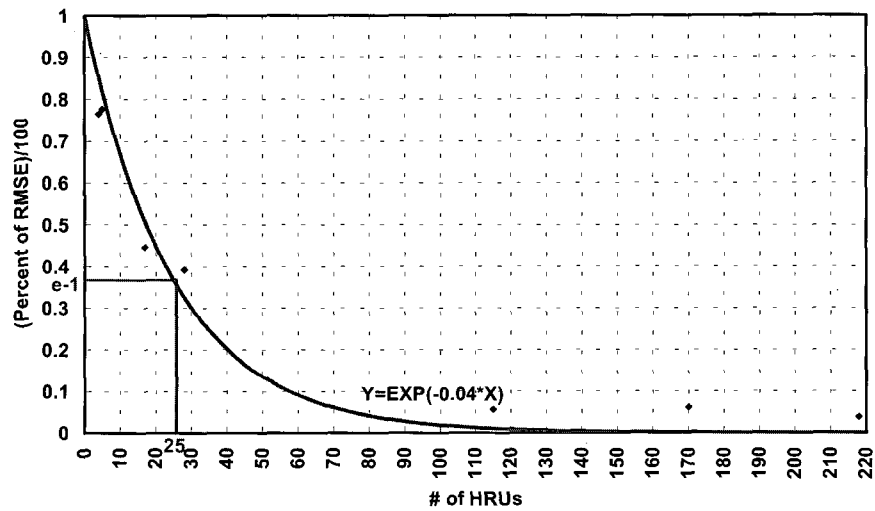


그림 8. 오차의 거동을 지수함수로 가정하는 경우 최적 HRU 개수의 추정

표 6. case별 강우계의 수와 강우계 밀도

case	대상지역분할		강우계 수	강우계 밀도	
	X	Y		개/km ²	km ² /개
case 1	1	1	1	0.00048	2095.75
case 2	1	2	2	0.00095	1047.88
case 3	2	2	4	0.00191	523.94
case 4	4	4	16	0.00763	130.98
case 5	6	7	42	0.02004	49.90
case 6	8	8	64	0.03054	32.75
case 7	12	14	168	0.08016	12.47
case 8	16	16	256	0.12215	8.19
case 9	20	20	400	0.19086	5.24
case 10	27	25	675	0.32208	3.10
case 11	41	33	1353	0.64559	1.55
True Value	83	101	8383	4.00000	0.25

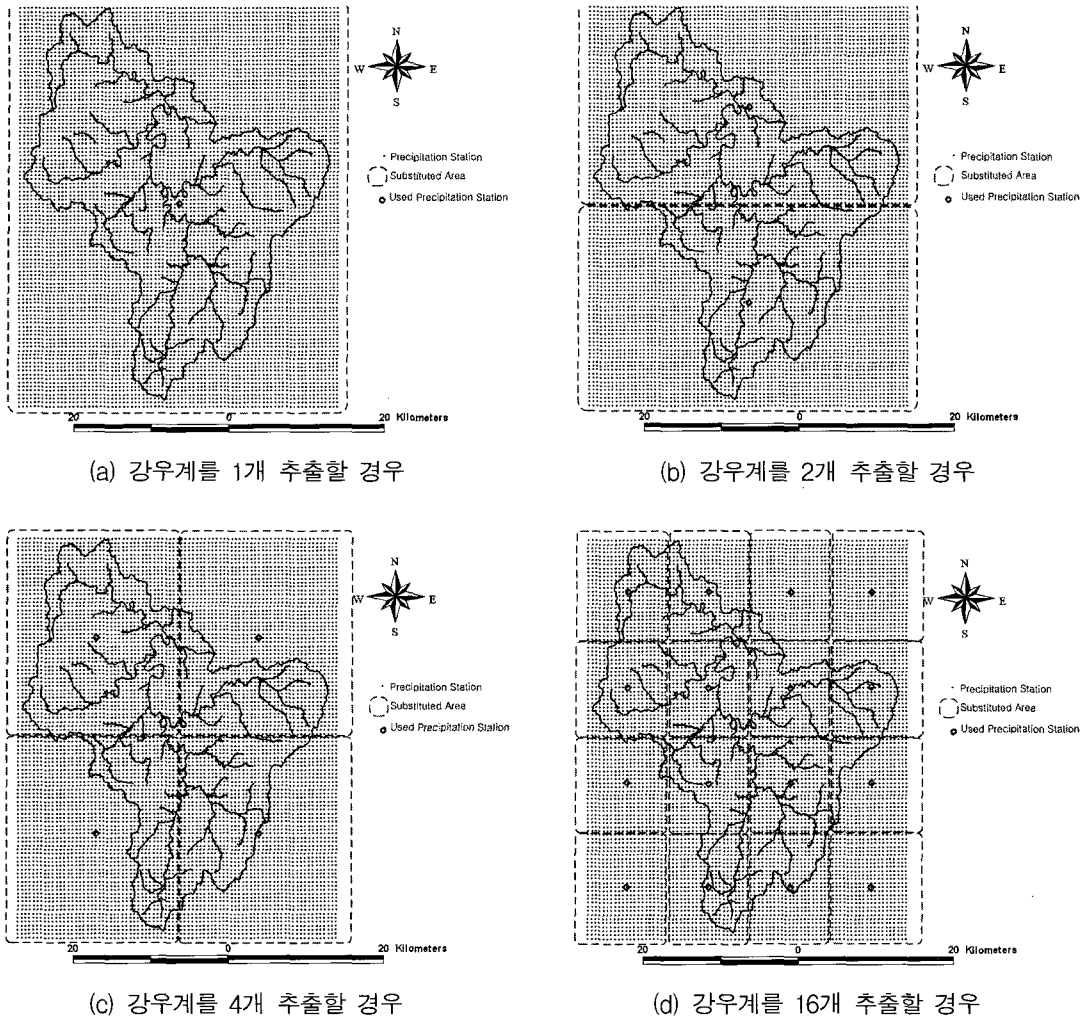


그림 9. 강우계 추출의 예시

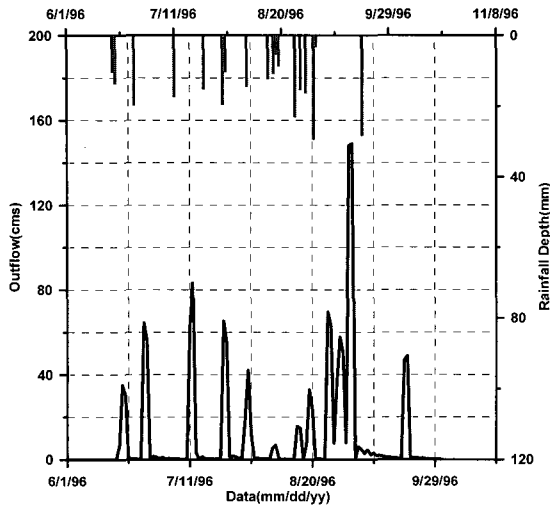
(2) 유출 모의 결과 및 오차분석

강우계의 수를 표 6의 case 별로 변화시키고, 강우자료를 제외한 나머지 기상인자는 거창관측소의 매개변수를

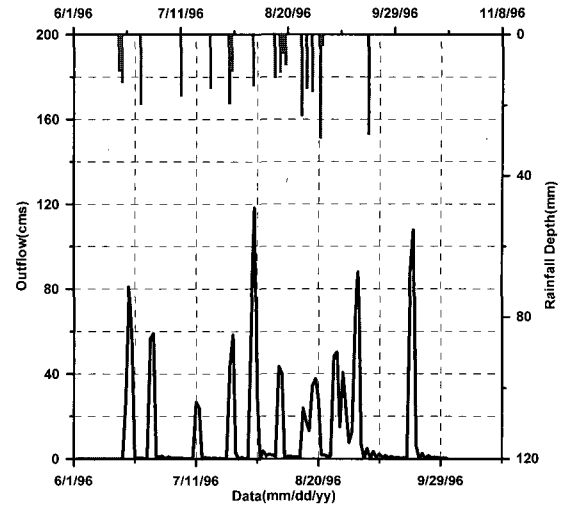
를 이용하여 모의 발생시켰다. case별로 모의된 유출 결과는 그림 10과 같다. 아울러, 이렇게 모의된 유출자료의 RMSE는 표 7과 같이 정리된다.

표 7. 강우계수, 강우계에 따른 RMSE와 RMSE 백분율

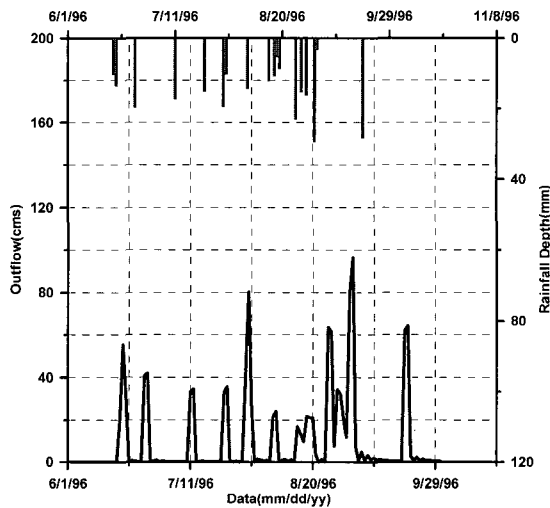
강우계수	강우계밀도(개/km ²)	RMSE	RMSE백분율/100
1	0.00048	9.602	0.404
2	0.00095	11.768	0.495
4	0.00191	9.309	0.392
16	0.00763	8.652	0.364
42	0.02004	3.068	0.129
64	0.03054	1.949	0.082
168	0.08016	1.767	0.074
256	0.12215	2.668	0.112
400	0.19086	1.557	0.066
675	0.32208	2.027	0.085
1353	0.64559	1.278	0.054



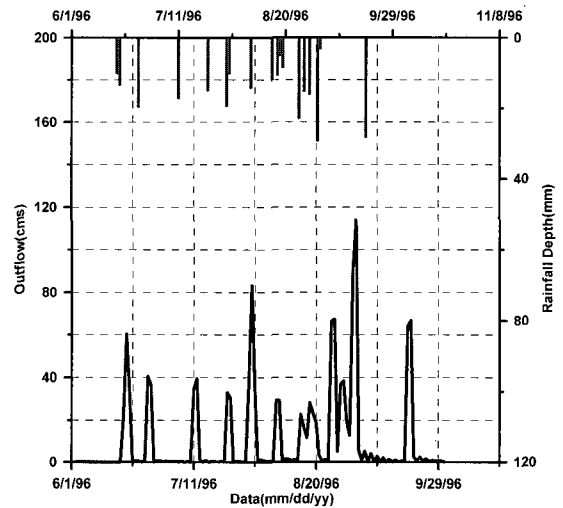
(a) 2(1×2)개



(b) 16(4×4)개



(c) 256(16×16)개



(d) 1353(41×33)개

그림 10. 강우계 수의 변화에 따른 유출결과의 변화

적정 강우계수의 추정은 적정소유역수의 추정에서와 마찬가지로 Nyquist의 샘플링 이론과 오차거동을 지수 함수적으로 가정하여 추정하였다. 그 결과는 그림 11과 같다. 이 결과에서 알 수 있듯이 적정 강우계 밀도는 0.005~0.007정도로 파악된다.

3.3 소유역의 규모와 강우계 밀도의 변화에 따른 유출의 변화양상

소유역 규모와 강우계 밀도에 동시에 변화를 주어 유출 모의를 실시하였다. 소유역 규모의 변화와 강우계 밀도의 변화는 앞에서 수행된 case에 따라 변화 시켰으며 그 결과는 아래의 표 8에 RMSE 백분율을 나타내었다. 여기서 참값은 소유역의 수가 111개이고 8,383개의 강우자료를 사용한 경우로 가정하였다.

그림 12는 계산된 결과 전체를 나타내는 경우에는

RMSE의 거동이 잘 나타나지 않아 강우계의 수가 8,383 개인 경우를 제외한 경우 및 소유역의 수가 최대인 경우(111개)까지를 포함하는 강우계가 200개까지인 경우를 나타낸 것이다. 위 그림, 특히, ●으로 표시된 것이 강우계의 수와 소유역의 수가 같을 경우의 RMSE이다.

그림 12에서는, 먼저, 소유역의 수 변화에 따른 RMSE 오차의 거동과 대체로 유사함을 알 수 있다. 약간의 차이는 소유역의 수가 같은 경우라도, 각 소유역에서 선택하는 강우계가 다르기 때문으로 판단된다. 또한 그림 12는 주어진 강우계의 수만큼 소유역의 수가 증가할 때 까지는 RMSE가 감소하나 이후에는 유사한 정도의 RMSE를 갖게 됨을 나타낸다. 즉, 유역 내 강우계의 수가 하나인 경우 소유역의 수에 상관없이 비슷한 유출오차의 규모를 나타내게 됨을 나타낸다. 따라서, 소유역의 수는 강우계의 수에 의존적이라 할 수 있다.

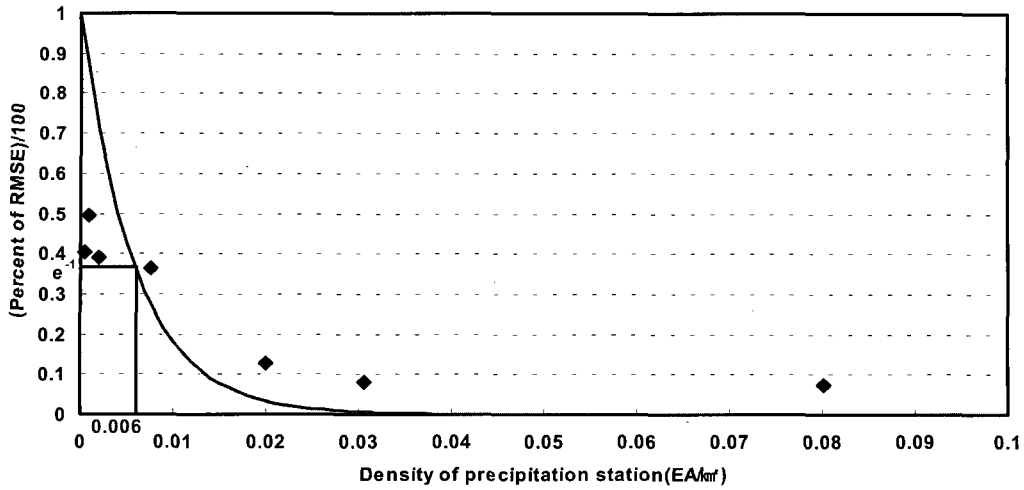


그림 11. 적정 강우계 밀도의 추정

표 8. 소유역수, 강우계수의 변화에 따른 유출량의 RMSE 백분율

소유역수		111	83	65	43	8	5	2	1
강우계수	1	0.404	0.403	0.402	0.405	0.501	0.451	0.526	0.547
	2	0.495	0.504	0.500	0.513	0.530	0.501	0.521	0.991
	4	0.392	0.395	0.393	0.401	0.488	0.419	0.565	0.897
	16	0.364	0.345	0.354	0.358	0.492	0.544	0.614	0.749
	42	0.129	0.131	0.131	0.148	0.381	0.406	0.740	0.782
	64	0.082	0.083	0.078	0.063	0.350	0.399	0.653	0.837
	168	0.074	0.083	0.103	0.115	0.345	0.387	0.631	0.854
	256	0.112	0.107	0.115	0.121	0.312	0.346	0.512	0.820
	400	0.066	0.071	0.066	0.083	0.314	0.387	0.722	0.833
	675	0.085	0.095	0.106	0.130	0.325	0.430	0.679	0.764
	1353	0.054	0.064	0.079	0.064	0.294	0.383	0.690	0.566
	8383	0.000	0.038	0.062	0.056	0.392	0.446	0.776	0.764

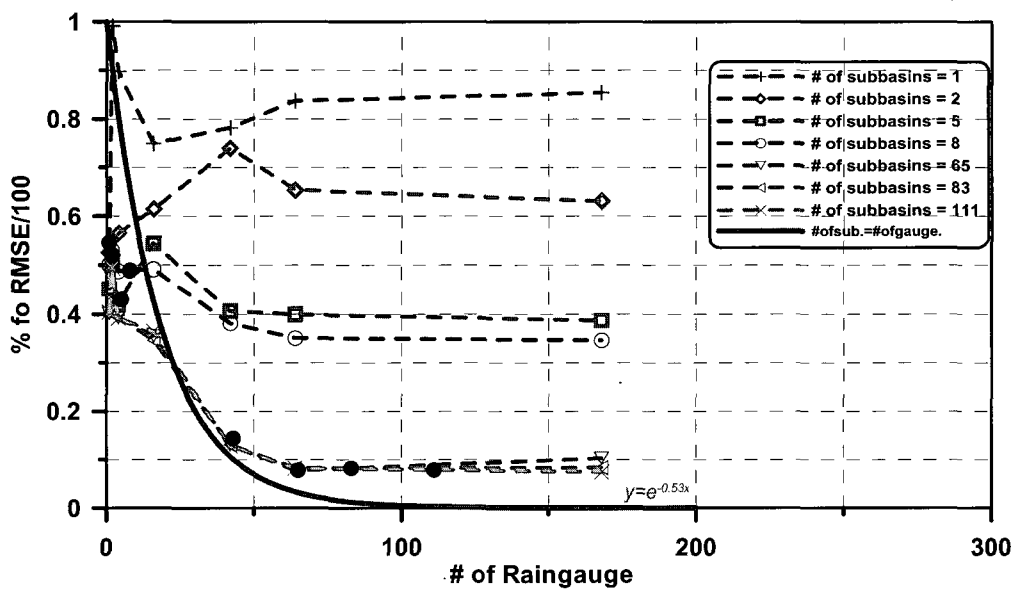


그림 12. 소유역 수와 강우계 수의 변화에 따른 RMSE 백분율

전체적으로 보면 용담댐 유역을 SWAT 모형으로 해석하는 경우 적절한 소유역 수는 13개 정도로 파악된다. 따라서, 각 소유역 당 평균면적은 약 80km² 정도가 된다. 이러한 결과는 적정 강우계 밀도로 파악되는 약 1개소/130km² 과는 약간의 차이를 보인다. 그러나 이것은 강우계의 밀도를 고려하는 과정에서 유역외의 면적을 고려했기 때문으로, 이를 배제하는 경우 유사한 규모가 된다. 앞서 언급한 것처럼 소유역의 규모와 강우계의 수는 서로 의존적이며 대체로 같은 정도라고 판단할 수 있다. 이는 각 소유역 별로 하나씩의 강우계 자료만을 이용하는 SWAT 모형의 특성상 당연한 결과이다. 본 연구에서 유도한 SWAT 모형 적용시의 적정 강우계 밀도는 WMO에서 제시하는 산지기준을 약간 상회하는 정도에 해당한다.

4. 결 론

본 연구에서는 다차원 강우의 모의 및 강우-유출해석을 통해 SWAT 모형 적용기의 적정 소유역 규모 및 강우계 밀도를 파악하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 전체적으로 보면 용담댐 유역을 SWAT 모형으로 해석하는 경우 적절한 소유역 수는 13개 정도로 파악된다. 이는 각 소유역 당 평균면적으로 약 80km² 정도에 해당한다.
- (2) 적정 강우계 밀도는 약 1개소/130km² 로 파악되는데 이는 소유역의 평균 규모와 과는 약간의 차이를 보인다. 이런 차이의 원인은 강우계의 밀도를 고려하는 과정에서 유역외의 면적도 고려했기 때문이며 이를 배제하는 경우 유사한 규모가 된다.
- (3) SWAT 모형의 경우 소유역의 규모와 강우계의 수는 서로 의존적이며 대체로 같은 정도로 나타난다. 이러한 결과는 각 소유역 별로 하나씩의 강우계 자료만을 이용하는 SWAT 모형의 특성상 당연한 결과이다. 이러한 강우계 밀도는 WMO에서 제시하는 산지기준을 약간 상회하는 정도에 해당한다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-2-1)에 의해 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

권명준, 권순국 (1998). "SWAT 모형에서의 유출량에

대한 HRU의 영향." **한국농공학회 학술발표회논문집**, pp. 349-352.

권명준, 권순국, 홍성구 (2003). "농촌유역 하천의 수질 예측을 위한 SWAT모형과 WASP모형의 연계운영." **한국농공학회지**, 제45권, 제2호, pp. 116-125.

김경탁, 최윤석 (2003) "유역분할에 따른 유출응답에 관한 연구." **한국수자원학회논문집**, 제36권, 제6호, pp. 911-924.

김상단, 유철상, 김중훈, 윤용남 (2000). "다차원 강우모형의 시간적인 특성 연구." **한국수자원학회논문집**, 제33권, 제6호, pp. 783-791.

장대원, 김형수, 서병하 (2003). "SWAT를 이용한 보청천 유역의 장기-유출 분석과 수질 모델링." **대한토목학회 정기학술대회논문집**, pp. 2169-2174.

장철희, 김현준, 김남원 (2003). "용담댐 유역의 장기-유출 분석을 위한 AVSWAT 2000 모형의 적용." **한국수자원학회 학술발표회논문집**, pp. 46-49.

정광식, 유철상, 김중훈 (2001). "유전자 알고리즘을 이용한 WGR 다차원 강우모형의 매개변수 추정." **한국수자원학회논문집**, 제34권, 제5호, pp. 473-486.

이현, 차은정, 최영진 (1999a). "SWAT/GRASS GIS Linkage를 이용한 기후 및 수자원 자료 분석 연구." **한국수자원학회 학술발표회논문집**, pp. 353-358.

이현, 차은정, 최영진 (1999b). "지리정보체계(GIS)를 이용한 수자원모델(SWAT)분석 연구." **한국기상학회 학술발표회논문집**, pp. 290-293.

임상준, Kevin M.B., Saied M., 조재필 (2003). "HSPF와 SWAT 모형을 이용한 산림유역의 유출 및 유사량 추정." **한국농촌계획학회지**, 제9권, 제4호, pp. 59-64.

황하선, 윤춘경 (2002) "SWAT과 HSPF의 유출특성 비교." **한국농공학회 학술발표회 논문집**.

Chatfield, C. (1989). *The Analysis of Time Series: An Introduction*, 5th Edition, Chapman and Hall, New York.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2001). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2000*, USDA Agricultural Research Service.

Waymire, E., Gupta, V.J., and Rodriguez-Itube, I. (1984). "A Spectral Theory of Rainfall Intensity at the Meso-β Scale." *Water Resource Research*, Vol. 20, No. 10, pp. 1453-1465.

(논문번호:04-113/접수:2004.12.13/심사완료:2005.04.29)