

장기유출 수문모형을 이용한 하천수질모형의 기준유량 산정

김상단[†] · 이건행^{*} · 김형수^{*}

부경대학교 환경시스템공학부

^{*}인하대학교 토목공학과

Low Flow Estimation for River Water Quality Models using a Long-Term Runoff Hydrologic Model

Sangdan Kim[†] · Keon Haeng Lee^{*} · Hung Soo Kim^{*}

Department of Environmental System Engineering, Pukyong National University

Department of Civil Engineering, Inha University

(Received 3 May 2005, Accepted 27 July 2005)

Abstract

In this study the flow curve estimation is discussed using TANK model which is one of hydrologic models. The main interest is the accuracy of TANK model parameter estimation with respect to the sampling frequency of input data. For doing this, input data with various sampling frequencies is used to estimate model parameters. As a result, in order to generate relatively accurate flow curve, it is recommendable to measure stream flow at least every 8 days.

keywords : Hydrologic model, Low flow, Water quality model

1. 서론

수질보전을 위한 오염총량관리계획이나 기타 하천수질개선사업을 위한 수질 모델링을 위해서는 해당 지역의 장기간의 하천 유황 자료가 필요하다. 그러나 1904년 이래 실시되어온 하천 수문 조사는 대부분 대 유역을 중심으로 이루어져, 오염총량관리 또는 여러 가지 하천수질개선사업의 주요 대상인 중소 유역에 대한 유황 자료가 절대 부족한 실정이다. 따라서 중소 유역의 수질관리계획의 수립을 위해서는 비유량법의 외삽이라는 비과학적인 방법에 근거한 유황으로부터 기준유량을 추정하고 있는 실정이다.

하천 유황의 예측 방법으로는 강우량에 의한 경험식, 인근 관측 자료가 있는 하천의 유황자료 전이법 및 수문 모형에 의한 모의발생방법 등 여러 가지 방법이 사용될 수 있다. 경험식의 대표적인 것은 가지야마 공식을 들 수 있는데 이는 월별 평균적인 유출량만을 제공하므로, 수질관리계획의 수립을 위한 일별 자료를 얻기에는 적절하지 못하다.

인근 관측 자료가 있는 하천의 유황자료 전이법의 경우 이를 확장·외삽하여 현재 수립 중인 대부분의 오염총량관리계획을 비롯한 다양한 수질관리계획에 가장 광범위하게 적용되고 있다. 통상 비 유량법이라 하는 이 방법은 일반적으로 한강 본류나 낙동강 본류와 같은 대형하천에서의

관측 자료를 이용한 외삽법에 의해 관심 유역 출구지점에서 기준유량을 산정하는 방법이다. 그러나 한강이나 낙동강과 같은 대형하천의 유역면적과 실제 수질관리계획 수립을 위한 대상유역의 유역면적은 열배 이상 차이가 나기 때문에 이들의 비유량이 서로 같다는 가정은 전혀 논리적이지 못하다(김 등, 2004).

오염총량관리계획을 예로 들자면, 유역의 허용총량이 이와 같은 방법으로 결정된 기준유량에 목표수질농도를 곱한 후 이를 다시 유달 계수로 나누어서 결정된다고 보았을 때, 기준유량의 적절한 산정은 해당 유역의 허용총량의 결정에 매우 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다. 현재와 같이 관측 자료가 완벽하게 구비되지 못하였을 경우, 가장 과학적인 하천 유황의 추정 방법은 장기유출 수문모형을 통해서만 가능하다고 할 수 있다. 장기유출 수문모형은 유역의 수문순환 과정을 수식화하여 수문 기상 자료로부터 유출량 또는 기타 수문, 수질 변량 등을 추정하는 것이라 할 수 있는데, 특히 우리에게 관심 있는 일 유출량을 위한 모형 중 우리나라에서 적용된 모형으로는 STANFORD 모형(선우, 1984), SSARR 모형(안, 1989), TANK 모형(박, 1993) 등이 있다.

그러나 장기유출 수문모형의 적용은 주로 연구 개발 단계에 국한되고 있어, 실용화에는 못 미치고 있는 실정이다. 그 원인은 우리나라 유역에 대하여 검정된 모형이 많지 않고, 이들 모형의 대부분도 그 입력 자료의 불확실성 등으로 미 계측 유역에의 적용이 쉽지 않기 때문이다. 특히, 중소 유역의 경우에는 수문 자료의 부족으로 충분히 검정된

[†] To whom correspondence should be addressed.
skim@pknu.ac.kr

모형을 찾기가 어려운 점도 장기유출 수문모형의 적용성을 떨어뜨리는 원인 중 하나이다.

그러나 오염총량관리계획의 수립을 위해서는 대략적으로 8일마다 1회의 하천 유량을 측정하기 때문에 모형 수립을 위한 최소한의 수문 자료가 확보될 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 오염총량관리계획을 비롯한 기타 수질관리계획의 수립 시 이와 같은 관측유량자료를 이용한 장기유출 수문모형의 구축이 가능할 것으로 보이며, 이로부터 보다 과학적인 기준유량을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 장기유출 수문모형 중 지금까지 가장 광범위하게 사용되어 오고 있는 모형 중 하나인 TANK 모형(Sugawara, 1995)을 선정하여 현재의 자료구축 수준에서의 기준유량을 어떻게 산정할 수 있는가에 관한 분석을 실시하였다. 이러한 장기유출 수문모형의 적용 시 가장 어려운 점은 모형의 매개변수를 어떻게 추정하여 관측수문곡선을 잘 재현할 것인가에 달려있다. 일반적으로 수질관리계획 수립의 과업기간은 1년에서 2년 사이이며, 이 때 관측을 할 경우 1년 단위로 수행하게 되는데, 이 때 관측 주기로는 유역 출구를 비롯한 주요 지점을 짧게는 8일 간격, 길게는 한달 간격으로 관측하는 것이 보통의 경우이다. 또한 측정 여건 상 청천 시에만 관측(어떤 경우에는 강우 후 10일이 지난 후 관측이란 다소 애매모호한 기준을 사용)하는 것이 관례화 되어 있다. 따라서 본 연구에서는 장기유출 수문모형을 적용할 경우 최소한 어떠한 주기로 관측을 해야 모형의 매개변수를 비교적 정확히 추정할 수 있는지에 관한 비교연구를 수행하였다.

비교방법은 관측 자료가 풍부한 댐 유입량 자료를 이용하는 것이 바람직한 것으로 판단되었다. 이러한 댐 유입량 자료를 바탕으로 일반적인 수질관리계획의 과업수행절차와 비슷하게 일년 자료를 가지고 장기유출 수문모형을 적용하는 것을 기준으로 하여, 1) 매일 관측하였을 경우, 2) 8일 간격 관측하였을 경우, 3) 15일 간격 관측하였을 경우, 4)

청천 시에만 관측하였을 경우로 각각 나누어 장기유출모형의 적용성을 비교하였다. 이 때, 적용성의 판별 기준으로는 풍수량, 평수량, 저수량, 갈수량 등 주요 통계적 기준유량을 어느 정도 잘 재현할 수 있는지가 주된 관심사항이 된다.

이러한 분석을 바탕으로 경기도 여주군 관내 금당천, 양화천, 청미천 하구에서 실제 관측을 수행한 자료를 바탕으로 장기유출 수문모형의 적용결과를 분석하고, 이로부터 도출한 주요 통계적 기준유량들이 한강 본류 여주지점의 유황분석 결과와 어떠한 차이를 보이는 지에 대한 비교를 수행하였다.

2. TANK 모형

2.1. TANK 모형의 개요

TANK 모형이란 대상 유역을 오리피스형의 유출공을 가진 몇 개의 저류형의 가상용기(TANK)를 조합하여 유량을 유량으로 변환하는 유출계산법으로 장기유출해석에서 비교적 높은 평가를 받고 있는 모형 중 하나이다. TANK 모형의 적용에서 가장 어려운 점들 중 하나는 모형 매개변수의 수가 많고, 이들을 시행착오에 의해서 결정하므로 직감과 경험에 의존할 수밖에 없는 점이나, 한편 계산법이 명확하고, 유출기구가 수문현상을 잘 재현한다는 점에서 모형의 객관성을 인정받고 있다. TANK 모형의 구성으로서는 병렬 TANK 모형과 직렬 TANK 모형이 있는데 Fig. 1에 보이는 직렬 TANK 모형이 일반적인 모형구조이다(배 등, 2003).

Fig. 1에서 각 TANK 우측의 공은 유출을 나타내고, 바닥의 공은 침투를 나타낸다. 강우는 가장 위에 있는 TANK에 주입되어, 침투한 강우는 바로 하단의 TANK로 주입된다. TANK 모형에서는 유효강우를 따로 계산하지 않고 관측된 강우량을 직접 이용하게 되는데, 역으로 TANK 모형에서의 강우는 어떤 형태든 모두 유출하게 되므로,

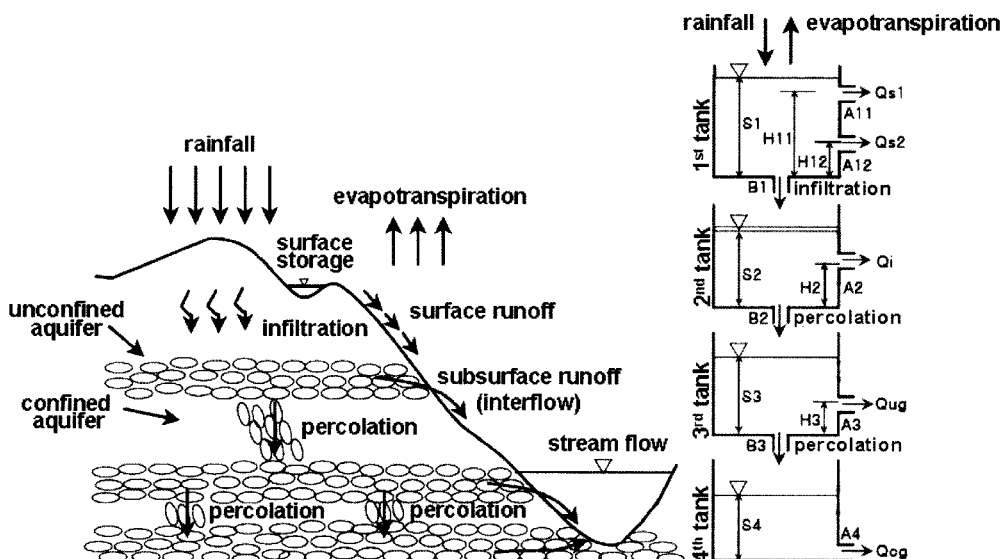


Fig. 1. TANK model concept.

TANK 모형에서는 유량과 강우의 계측 정밀도가 물수지에 있어서 매우 중요하게 작용한다고 볼 수 있다. 또한, TANK 모형의 계산법은 단순한 선형계산이지만 여러 유출공에 의한 유출이므로 비선형적인 물수지 계산이 이루어진다고 할 수 있다.

2.2. TANK 모형과 유출현상의 관계

강우는 TANK 모형 가장 위에 있는 TANK에 주입되며, 두 번째 이하의 TANK는 바로 위 TANK 바닥면의 침투공에서 물을 공급받게 된다. 각 TANK 내에 저류된 물 중 일부는 측면의 공에서 외부로 유출되고, 일부는 바닥면의 공에서 아래의 TANK로 다시 주입된다. 이 때, 각 단의 TANK 측면 공에서의 유출의 합이 하천유량이 되는 것이다. 즉, 강우는 순차적으로 지하로 침투하고 각 대수층에서 각각 유출해서 하천유량을 형성하는 것으로 이해할 수 있다.

직렬 TANK 모형을 유역의 유출현상에 대응시킨다면, 먼저 유역에 비가 올 경우 지표에 내린 강우는 지표면 저류, 침투, 증발산 등 초기손실이 발생하고 지표면 유출이 시작된다. 따라서 1단 TANK 아래쪽의 유출공이 바닥에서 조금 위쪽으로 붙어 있는 것은 이 초기손실에 대응하는 것이 된다. 그리고 강우가 계속되면 지표면 유출은 점점 증가되어, 1단 TANK 위쪽의 유출공에서의 유출이 나타나게 되며, 1단 TANK의 유출은 지표면 유출(Q_s)에 해당한다. 지면에 내린 강우의 일부는 지표 하로 침투해 들어가며, 그것은 1단 TANK의 바닥 면에 붙어있는 침투공으로 표현되며, 지표면에서 침투한 강우가 지표 하 불투수층에 도달하면 다시 지표면으로 유출되는데 이와 같은 유출은 2단 TANK의 측면의 유출공을 통한 유출에 대응하며 이를 중간유출(Q_i)이라 한다. 침투한 강우는 다시 깊이 침투해 안정한 지하수 유출로서 갈수 시에 완만하게 하천으로 유출되는데, 이것은 3단 및 4단 TANK의 측면 유출공에 대응하는 지하수 유출을 형성하는 것이다. 여기서 3단 TANK는 비피압지하수 유출(Q_{ug}), 4단 TANK는 피압지하수 유출(Q_{cg})에 대응하는 것이라 볼 수 있다.

이런 과정을 통하여 유역의 하천 유출량은 각 TANK에서의 유출량의 합으로 산정되는데, 수질 모형에 주로 적용되는 비 홍수기 유출 계산의 경우에는 통상 4단의 TANK 모형으로 13~15의 매개변수를 이용하게 되는 것이 일반적이다.

2.3. TANK 에서의 유출량 및 침투량의 계산

유역 내 저류량의 변화를 연속방정식으로부터 구하여, t 일의 정보로부터 $t+1$ 일의 저류량을 표시하면 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$S_{t+1} = S_t + R_t - Q_t - E_t - D_t \quad (1)$$

여기서, S 는 저류량, R 는 강수량, Q 는 유출량, E 는 증발산량, D 는 지하 배출량이다. 유역의 지표면 유출량은 저

류량과의 관계를 다음과 같이 가정하게 된다.

$$Q = a(S - S_D) \quad (2)$$

여기서, a 는 유출계수, S_D 는 한계 저류량으로 유출이 발생하지 않는 토양공극수량을 나타낸다. 위의 식 (1)과 (2)를 이용하여 유역의 저류량과 유출량의 관계를 Fig. 1과 같이 여러 개의 저수지의 조합으로 개념화한 TANK 모형이 구성될 수 있으며, 식 (2)의 한계 저류량을 유출공의 높이로서 표시함으로써 저류량이 그 값 이상일 때 유출되는 것으로 표시하게 된다. 또한, 여러 개의 TANK는 유역의 유출지체효과를 나타내는 것이며, 상하부 TANK 사이에는 상부의 침투량이 하부로 유입하는 것으로 하여, 수문곡선의 감수부를 수치적으로 표현하는 것이다.

TANK 모형의 매개변수는 크게 다음 3가지 형태로 나눌 수 있다.

- 각 TANK에서의 유출계수를 나타내는 매개변수(Fig. 1에서의 A11, A12, A2, A3, A4)
- 각 TANK에서 침투계수를 나타내는 매개변수(Fig. 1에서의 B1, B2, B3)
- 각 TANK의 한계 저류량과 초기 저류량을 나타내는 매개변수(Fig. 1에서의 H11, H12, H2, H3, S1, S2, S3, S3)

따라서 TANK 모형의 기본형태인 4단 TANK일 경우 최소 16개의 매개변수가 필요하게 되며, 유역에 따라서는 TANK의 수나 유출공의 수 등을 조절하거나 증발산 관련 매개변수를 추가하여 모형을 구성할 경우 추정해야 할 매개변수의 수는 더 늘어나게 된다.

3. TANK 모형의 적용

3.1. 대상유역

서론에서 설명한 분석을 수행하기 위한 대상유역은 낙동강 수계의 밀양댐, 한강 수계의 횡성댐, 괴산댐을 선정하였으며, 이들 댐의 유입량 자료 및 유역 평균 강우자료는 수자원종합정보 웹 사이트(www.wamis.go.kr)에서 수집하였다. 이들 댐의 유역면적은 각각 밀양댐 95.4 km², 횡성댐 209 km², 괴산댐 670 km²로 일반적인 수질관리계획이 수립되는 유역면적과 가급적 유사한 규모의 유역을 선택한 결과이다. 자료는 세 지점 모두 2004년 365일 자료를 이용하였다.

3.2. 증발산량 추정

장기유출계산은 일반적으로 1일단위로 1년 이상에 걸쳐 계산을 하는 것으로 연강우량과 연유출고와의 차이인 유역 손실량 대부분이 유역의 증발산에 의한 것이라고 추정하게 된다. 그러나 대상 유역에서의 증발산량 자료는 획득되어 있지 못하며, 또한 유역내의 지면과 수목 등에서의 증발산량을 산정하는 확정적인 방법이 없는 것이 일반적이다. 따라서 과거의 강우량 및 유출고에 의한 유역물수지 등에서

손실량을 계산하고 이 양을 증발산량으로 하는 등의 적절한 가정이 필요하게 된다.

유역의 잠재 증발산량은 기온 자료를 근간으로 산정하는 Thornthwaite 방법, 수정 Blaney-Criddle 방법과 일사량 자료를 근간으로 산정하는 Jensen-Haise 공식이 있으며, 이 외에도 유역의 실제 증발산량을 직접 산정할 수 있는 Penman FAO-24 방법, Penman-Montheis 방법 등 다양한 방법이 존재하나, 장기유출계산에서는 매일 매일의 증발산량보다도 장기간의 총 증발산에 의한 손실량을 일치시키는 것이 중요한 사항으로 작용한다. TANK 모형의 성능과 증발산량 산정방법들 사이의 비교분석은 강 등(2004)의 연구를 통하여 살펴볼 수 있다.

본 연구에서는 연구 목적 상 증발산량 산정이 주요한 사항은 아니므로, 비교적 간단한 증발산량 산정방법인 Thornthwaite 방법을 이용하였다. Thornthwaite 방법을 이용한 증발산량의 산정 시 월 평균기온 및 월 상대습도 자료가 필요한 바, 이는 밀양댐의 경우에는 기상청 밀양 측후소, 횡성댐의 경우에는 원주 측후소, 괴산댐의 경우에는 제천 측후소에서 자료를 이용하였다. Thornwaite 방법의 자세한 내용은 윤(2005)을 참조할 수 있다.

3.3. TANK 모형의 매개변수 추정

TANK 모형은 추정해야 할 매개변수가 많아 단순한 수학적 방법으로는 각 TANK의 매개변수를 올바르게 추정할 수 없으므로 시행착오법에 의해서 추정하는 것이 일반적인 방법이었다. 그러나 TANK 모형의 매개변수 해석은 경험과 이에 따르는 직감이 요구돼 처음 시도하는 사람은 방대한 계산을 해야 하기 때문에 매개변수 추정은 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 그러나 최근 컴퓨터 기술의 발전에 따라 컴퓨터에 의해 자동적으로 최적 계산을 하는 방법, 예를 들면 Powell 방법, Standardized Powell 방법, Simplex 방법, Sequential Quadratic Programing (SQP) 방법 등이 개발되어 매개변수의 추정을 용이하게 할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 이들 중 제약적인 조건하에서의 비선형 매개변수 최적화 기법인 SQP 방법을 이용하여 TANK 모형의 최적매개변수를 추정하였다. SQP 방법에 대한 자세한 사항은 Gill 등(2002)을 참조할 수 있다.

이 때 매개변수 추정을 위한 입력 유량자료로서, 일단위의 관측 자료를 모두 사용하여 매개변수를 추정하는 경우(일자료)와 8일 간격의 관측 자료만을 사용하는 경우, 15일 간격의 자료를 사용하는 경우 및 청천 시에만 관측하였을 경우(건기에는 8일정도의 간격이나, 우기에는 거의 관측하지 않을 경우)로 각각 나누어 TANK 모형의 매개변수를 각각 추정하였다. 이는 이렇게 추정된 매개변수들을 적용한 TANK 모형이 원래 관측 자료의 풍수량, 평수량, 저수량, 갈수량 등 주요 통계적 기준유량을 어느 정도 재현할 수 있는지를 알아보기 위함이다.

Table 1에 적용된 세 지점 중 횡성댐 지점의 유입량에 대한 TANK 모형의 매개변수 추정 결과를 관측 자료의 해상도별(1일 간격, 8일 간격, 15일 간격, 청천 시)로 표시하였다. 관측 자료의 해상도별로 약간씩 다른 값의 매개변수 값이 추정되었음을 알 수 있으며, 실제 관측 자료와 비교하였을 경우에는 1일 간격 자료가 가장 정확하게 수문곡선을 재현할 수 있는 것을 알 수 있으며, 그 다음으로는 8일 간격의 자료가 우수한 재현성을 보였다. 청천 시 관측한 것을 가정하여 매개변수를 추정한 후 일 유출량을 모의한 결과를 살펴보면 밀양댐의 경우는 8일 간격, 횡성댐의 경우에는 15일 간격의 자료를 이용하여 모의한 유출량과 비슷한 정확도를 보여주었으며, 괴산댐의 경우에는 15일 간격의 자료를 이용하여 모의한 유출량보다도 부정확한 모의 결과를 얻을 수 있었다. 각각에 대한 결과는 아래와 같은 식 (3)에 의해 정량화할 수 있으며, 이에 대한 결과를 Table 2에 수록하였고, 그 중 밀양댐에 대한 결과를 Fig. 2에 도시하였다.

여기서, Q_o 는 관측된 유량이며, Q_s 는 TANK 모형을 통하여 모의된 유량이다. Fig. 2 (a)-(d) 각각에서 첫 번째 그

Table 1. TANK model parameter estimation at Hoengseong dam inflow discharge data

Parameter	1-day frequency	8-day frequency	15-day frequency	w/o rainy day
S1	10.0000	5.8321	0.0000	4.9985
S2	6.3342	10.8446	1.9539	9.9989
S3	24.3007	20.6460	2.3010	19.9994
S4	40.9980	40.0368	40.4430	39.9981
A11	0.2948	0.1000	0.1000	0.8910
A12	0.1000	0.2448	0.1000	0.1000
A2	0.4351	0.1195	0.5000	0.4622
A3	0.0059	0.0127	0.0574	0.0566
A4	0.0005	0.0005	0.0007	0.0013
B1	0.1080	0.1360	0.5000	0.2208
B2	0.2405	0.1347	0.2824	0.1884
B3	0.0256	0.0347	0.1000	0.0821
H11	83.9214	80.0402	77.1075	79.9946
H12	50.3093	49.5109	48.4318	50.0125
H2	7.6909	14.9250	11.3427	15.0073
H3	0.7086	8.4545	1.4942	10.0364

Table 2. Accuracy with respect to sampling frequencies

F	1-day frequency	8-day frequency	15-day frequency	w/o rainy day
Milyang dam	0.2722	0.3406	0.3502	0.3339
Hoeongseong dam	0.2865	0.4002	0.5672	0.5742
Goisan dam	1.0176	2.1010	3.2668	5.0780

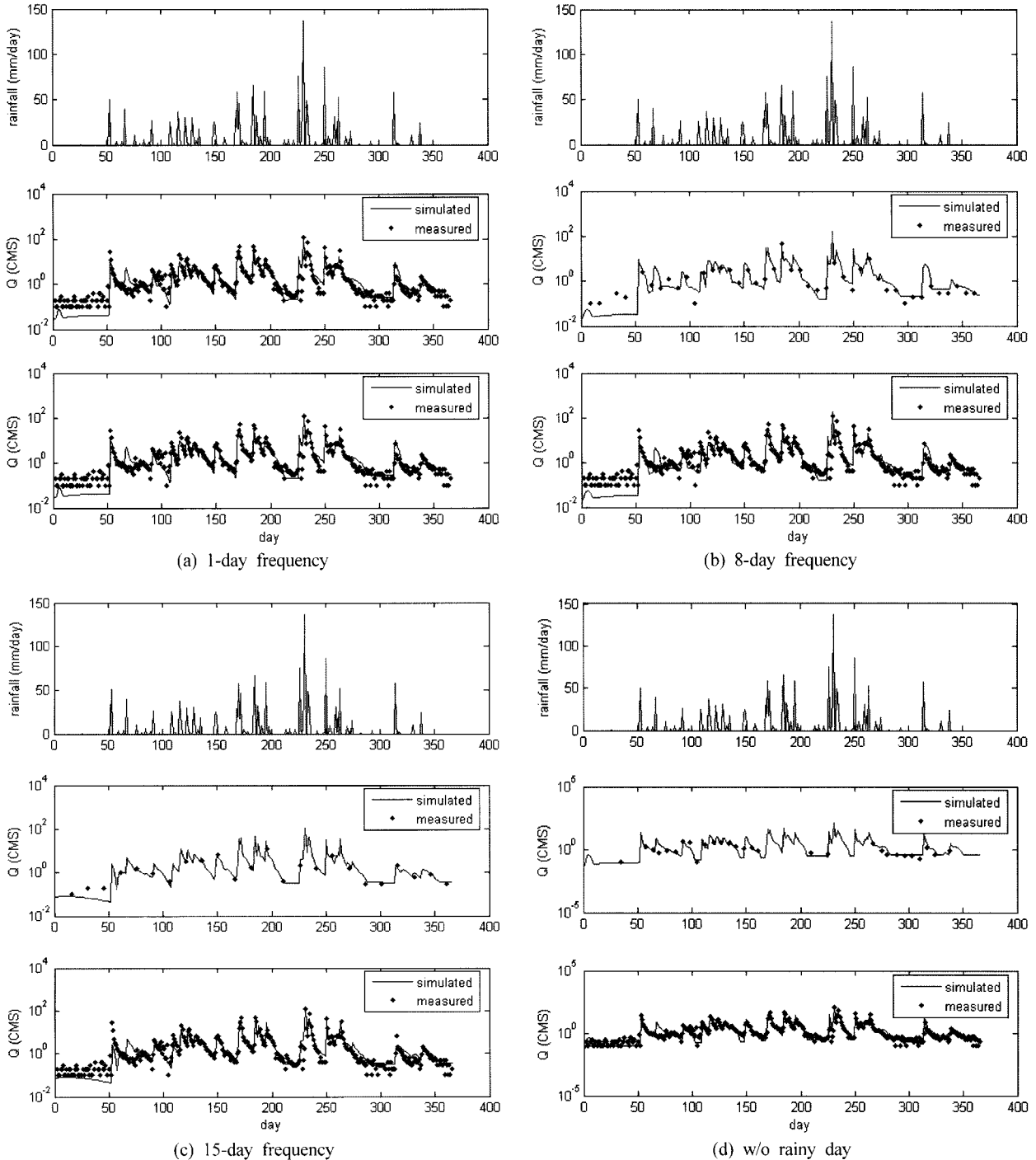


Fig. 2. Milyang dam discharge simulation.

$$F = \frac{1}{365} \sum_{t=1}^{365} (\sqrt{Q_{o,t}} - \sqrt{Q_{s,t}})^2 \quad (3)$$

림은 각각의 댐 상류유역 평균 강수량을 도시한 것이며, 두 번째 그림은 매개변수 추정에 사용된 관측 자료(1일, 8

일, 15일 간격 및 청천 시)와 함께 모의된 유출량을, 세 번째 그림은 실제 일별 관측 자료와 모의된 유출량을 각각 도시하였다. 실제 수질개선관련 계획 수립 시에는 8일 간격, 15일 간격 또는 청천 시의 관측 자료만이 확보된다고 보았을 때, 이들 자료들을 통하여 매개변수를 추정할 후

유출량을 모의할 경우 관측 자료는 잘 재현하더라도, 관측되지 않은 날의 자료도 잘 추정되었다는 확증을 할 수 없을 것이다. Fig. 2의 밀양댐 모의 결과를 살펴보면, 유량이 특히 작을 때(예를 들어, 3월 초순)를 충분히 재현할 수 없음을 알 수 있으며, 이러한 사실은 15일 관측이나 청천 시 관측으로는 우리가 모의한 유출량이 어느 정도 정확도를 가지고 있는지 파악하기가 사실상 불가능함을 시사하고 있는 것이다. 이는 횡성댐이나 괴산댐에서도 공통적으로 발견되는 사항으로, 최소한 8일 주기로는 관측하여야 비교적 제대로 된 유출량을 모의할 수 있으며, 우리가 모의한 유출량이 어느 정도의 정확도를 가지고 있는지가 파악될 수 있을 것으로 판단된다.

3.4. 주요 통계적 기준유량 산정 결과

위에서 설명한 바와 같이 1일 간격, 8일 간격, 15일 간격, 그리고 청천 시에만 관측한 자료를 이용하여 TANK 모형의 매개변수를 추정한 후, 이를 이용하여 일 유출량을 모의하였으며, 모의된 일 유출량 자료를 정리하여 풍수량, 평수량, 저수량, 그리고 갈수량을 산정, 이를 원래의 관측 자료(1일 자료)와 비교하였다. 비교 결과를 Table 3에 나타내었다. 3.3절에서의 분석과 같이 최소한 8일 주기로는 관측하여야 비교적 제대로 된 풍수량, 평수량, 저수량 및 갈수량이 산정될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 갈수량의 경우는 1일 간격으로 관측을 시행하더라도 본 연구에서 작성한 TANK 모형으로는 적절하게 모의하는 것이 때로는 힘든 것으로 분석되었다. 이는 주로 매개변수 추정 절차에서 기인하는 것으로서, 아무래도 유량이 많은 경우가 매개변수를 추정하는 과정에서 보다 큰 가중치를 가지고 있기 때문인 것으로 판단된다. 다시 말해서 매개변수 추정 시 비선형 최적화 기법을 이용하게 되는데, 일반적으로 매개변수 추정을 위한 최적화 문제의 경우 관측 자료와 모의 자료 사이에 차이가 최소가 되도록 하는 목적함수를 사용하게 되며, 본 연구에서 사용한 목적함수는 식 (4)이다.

$$minimize f = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\sqrt{Q_{o,i}} - \sqrt{Q_{s,i}})^2 \quad (4)$$

여기서, N 은 관측 유량자료의 수, Q_o 는 관측된 유량, Q_s 는 TANK 모형을 통하여 모의된 유량이다. 이로부터 식 (4)가 최소가 되도록 하는 매개변수가 추정될 수밖에 없고, 이는 곧 유량이 많은 경우를 중심으로 하여 매개변수가 추정됨을 의미하게 되며, 따라서 갈수량보다는 풍수량 쪽을 더 잘 재현하게 되는 것이다. 이를 방지하기 위하여 식 (5)와 같은 목적함수를 상정하여 볼 수 있다.

$$minimize f = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left(1 - \frac{Q_{s,i}}{Q_{o,i}} \right)^2 \quad (5)$$

식 (5)와 같이 목적함수를 상정할 경우 유량이 큰 경우보다는 유량이 작은 경우를 상대적으로 더 잘 재현하는 모형 매개변수를 추정할 수 있으나, 실제 적용하여 본 결과 전체적인 유황을 재현하는데 있어서 더 좋지 않은 결과를 주는 것으로 확인되었다. Fig. 3에 Table 3의 결과 중 괴산댐에 대한 결과를 도시하였다. 다양한 목적함수에 따른 TANK 모형의 매개변수 추정결과에 대한 비교는 성 등 (2004)을 참조할 수 있다.

3.5. 여주 지역에서의 적용

지금까지의 분석을 바탕으로 경기도 여주군 관내 금당천, 양화천, 청미천 하구에서 실제 관측을 수행한 자료를 바탕으로 TANK 모형의 적용결과를 분석하고, 이로부터 도출한 주요 통계적 기준유량들이 한강 본류 여주지점의 유황분석 결과와 어떠한 차이를 보이는 지에 대한 비교를 수행하였다.

분석 대상 유역인 금당천, 양화천, 청미천 유역의 면적은 각각 92.57 km², 186.1 km², 615.39 km²이며, 2004년 한 해 동안 각 하천 출구에서 총 29회의 유량 관측을 실시하였다. 관측 주기는 건기에는 8일 주기를 유지하는 것을 원칙으로 하였으며, 우기에는 거의 관측이 이루어지지 못하였다. 지금까지의 분석과 비교한다면, 청천 시의 경우와 거의 유사한 관측 주기를 보인다고 할 수 있다. 모형의 구축 등

Table 3. Main statistical discharge value

UNIT (CMS)		Measured Value	Simulated Value			
			1-day frequency	8-day frequency	15-day frequency	w/o rainy day
Milyang dam	Q095	2.4000	2.4425	2.8537	2.6305	2.8228
	Q185	0.7000	0.8599	0.6178	1.0445	0.8638
	Q275	0.3000	0.2772	0.3055	0.3500	0.3362
	Q355	0.1000	0.0365	0.0292	0.0562	0.0834
Hoeong-seong dam	Q095	3.3000	2.9576	3.1231	4.3144	3.2481
	Q185	1.4000	1.1324	1.3133	1.6237	1.6017
	Q275	0.7000	0.6289	0.7639	0.6281	0.7021
	Q355	0.1000	0.3397	0.2450	0.0960	0.2240
Goisan dam	Q095	9.7000	8.5724	9.0096	8.6511	11.1305
	Q185	4.3000	4.4044	4.3612	4.8028	7.3451
	Q275	2.5000	2.7312	2.7010	1.3862	5.0882
	Q355	1.7000	1.5658	1.7137	1.0084	1.6759

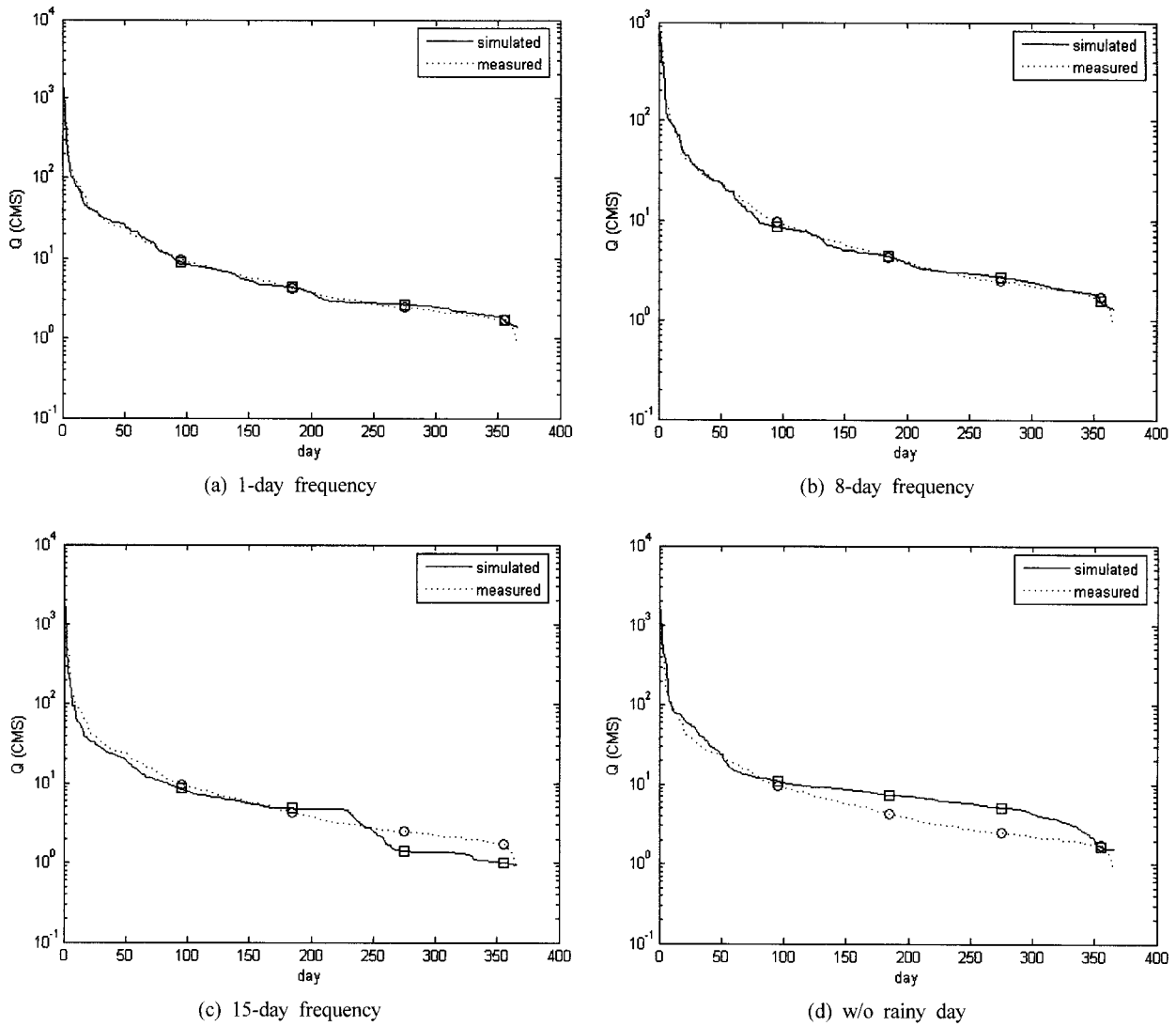


Fig. 3. Goisan dam flow curve.

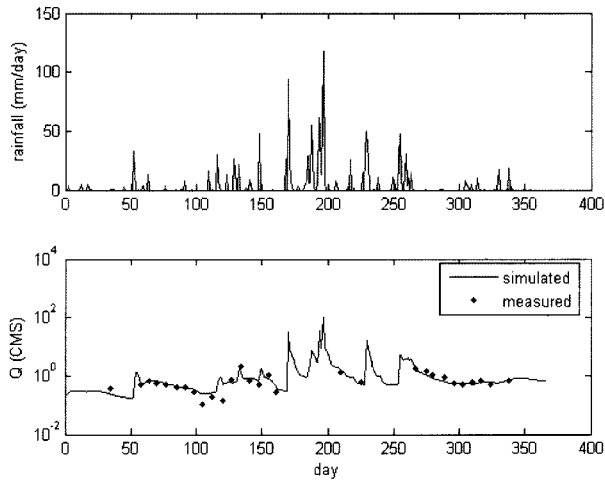
분석에 필요한 강우자료는 기상청 여주 지점의 일 강우자료를 이용하였으며, 증발산량 자료 또한 동 지점의 자료를 이용하여 Thornthwaite 방법으로 계산하였다.

관측 자료를 이용하여 TANK 모형의 매개변수를 SQP 방법에 의해 추정된 후, 이를 사용한 유출량 모의 결과는 Fig. 4와 같다. 모의된 유출량 자료를 사용하여 주요 통계적 기준유량을 산정하여 이를 남한강 본류 여주 수위표 지점의 자료를 이용하여 비유량법을 통한 각 하천의 유황 분석 결과와 비교한 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 이 때, 여주 수위표 지점의 유황은 상류 충주댐 건설 전의 자료를 이용하여 산정하였다. TANK 모형을 이용한 유출모의 결과와 인근 본류 하천의 관측 자료로부터 비유량법을 통하여 구한 유출모의결과를 비교한 결과, 금당천, 양화천, 청미천 모두 평수량과 저수량 특히 저수량에 있어서 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 여기서 주목해야할 점은 비유량법을 통하여 구한 유출모의결과와의 일치여부가 아니라 청천 시의 관측을 바탕으로 측정된 자료를 이용한 TANK 모형의 매개변수 추정과 그로부터 구한 유황곡선이 과연 어느 정도 정확성을 갖는가에 있다. 3.3 및 3.4

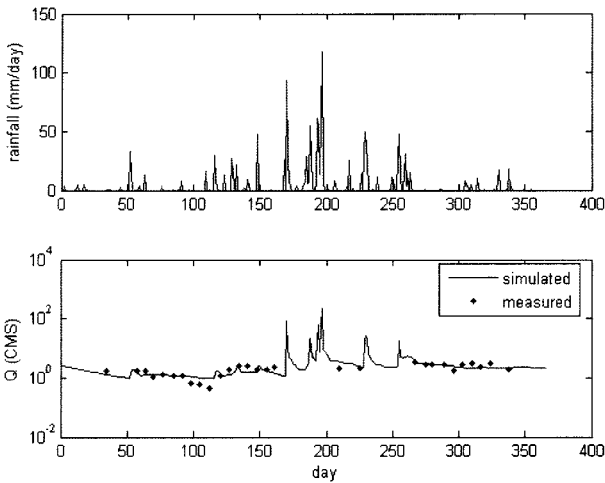
절의 분석에 따르면 최대 8일 간격으로 관측하여야만 TANK 모형의 결과를 신뢰할 수 있는 점으로 볼 때, 청천 시 관측을 바탕으로 구한 금당천, 양화천, 청미천의 유황곡선이 어느 정도 실제와 잘 일치하는 지는 쉽게 결론을 내기가 곤란할 것으로 판단되었다.

4. 결론

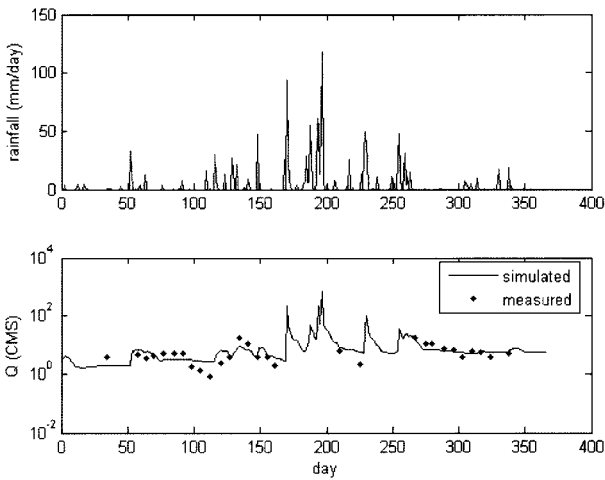
본 연구에서는 장기유출 수문모형 중 TANK 모형을 선정하여 현재의 자료구축수준에서의 기준유량을 어떻게 산정할 수 있는가에 관한 분석을 실시하였다. 비교적 관측 자료가 풍부한 댐 유입량 자료를 바탕으로 일반적인 수질 관리계획에서의 과업수행절차와 비슷하게 일년 자료를 가지고 TANK 모형을 적용하는 것을 기준으로 하여, 1) 매일 관측하였을 경우, 2) 8일 간격 관측하였을 경우, 3) 15일 간격 관측하였을 경우, 4) 청천 시에만 관측하였을 경우로 각각 나누어 모형의 적용성을 비교하였다. 이 때, 평수량, 저수량, 갈수량 등 주요 통계적 기준유량을 어느 정도 재현할 수 있는지 또한 파악하고자 하였다.



(a) Geumdang stream



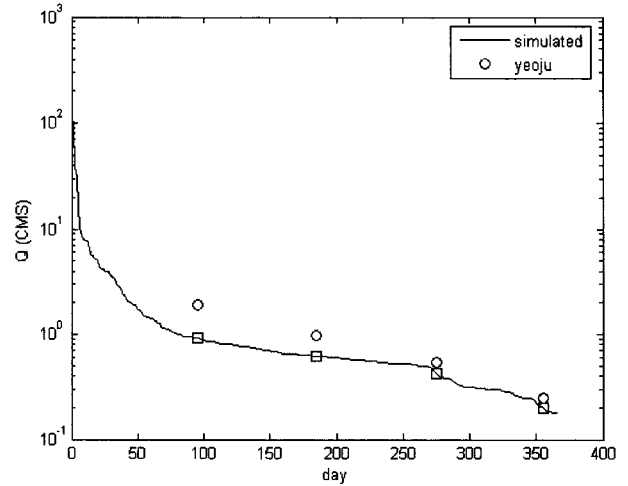
(b) Yanghwa stream



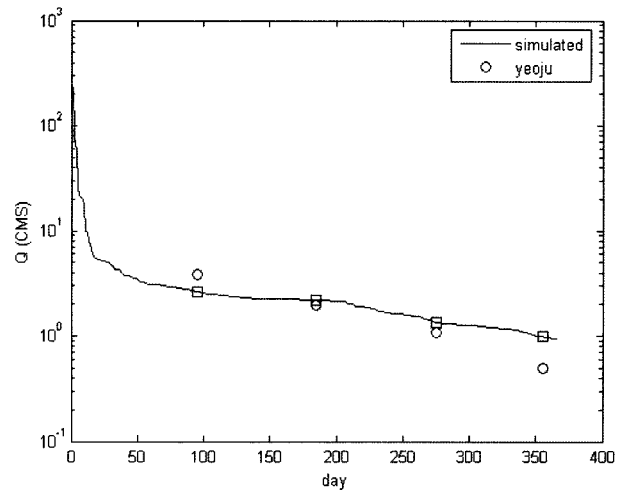
(c) Cheongmi stream

Fig. 4. Yeosu region discharge simulation.

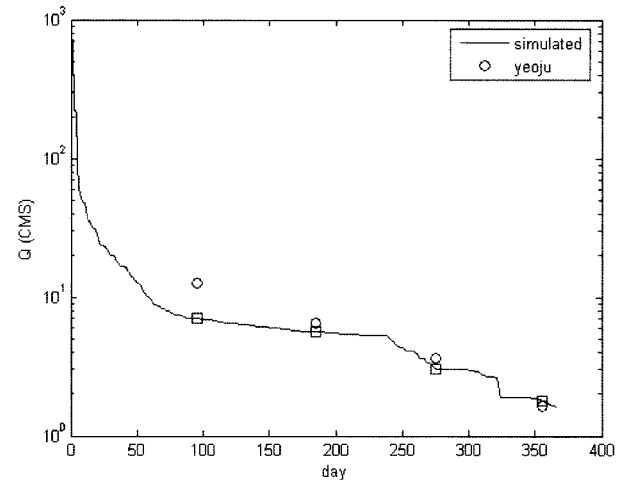
분석 결과 관측 주기는 최소 8일 간격은 유지하여야만 상대적으로 정확한 모형의 매개변수를 추정할 수 있음을 알 수 있었다. 풍수량, 평수량, 저수량, 갈수량 등 수질모형에서 주요 사용하는 기준유량의 재현성 여부 또한 최소 8



(a) Geumdang stream



(b) Yanghwa stream



(c) Cheongmi stream

Fig. 5. Yeosu region flow curve.

일 간격으로는 관측을 시행하여야 비교적 신뢰성 있는 기준유량을 산정할 수 있었으나, 갈수량에 있어서는 정확한 산정에 어려움이 있음을 확인하였다.

이러한 분석을 바탕으로 경기도 여주군 관내 금당천, 양

화천, 청미천 하구에서 실제 관측을 수행한 자료(청천 시에만 관측)를 바탕으로 위와 같은 분석을 동일하게 실시한 결과, TANK 모형을 통하여 산정한 주요 통계적 기준유량들과 한강 본류 여주 수위표 지점의 자료로부터 비유량법을 통하여 산정한 기준 유량들과는 평수량과 저수량 부분에서 비교적 큰 일치도를 보이고 있음을 파악할 수 있었으나, 이러한 일치도가 실제 하천 유황의 올바른 재현인지의 여부는 또 다른 문제일 것이다.

참고문헌

- 강신욱, 이동률, 이상호, 토양수분 저류구조를 가진 탱크모형의 보정에 관한 연구, *한국수자원학회논문집*, **37**, pp. 133-144 (2004).
- 김상단, 송미영, 김형수, 수질모델링을 위한 유달부하량의 수리수문학적 산정, *한국습지학회지*, **6**, pp. 47-54 (2004).
- 박승우, Tank 모형 셀 프로그램을 이용한 증소하천의 일 유출량 추정, *한국수문학회지*, **26**, pp. 47-61 (1993).
- 배덕효, 정일원, 강태호, 노준우, 유출성분을 고려한 Tank 모형의 매개변수 자동추정, *한국수자원학회논문집*, **36**, pp. 423-436 (2003).
- 선우중호, 강우-유출모형 Stanford Watershed Model, *한국수문학회지*, **17**, pp. 250-258 (1984).
- 성윤경, 김상현, 김현준, 김남원, 다양한 목적함수와 최적화 방법을 달리한 SIMHYD와 TANK 모형의 적용성 연구, *한국수자원학회논문집*, **37**, pp. 121-131 (2004).
- 안상진, SSARR 모형에 의한 유역유출 해석, *한국수문학회지*, **22**, pp. 109-116 (1989).
- 윤용남, *공업수문학*, 청문각, pp. 93-128 (2005).
- Gill, P. E., Murry, W. and Saunders, M. A., SNOPT: An SQP Algorithm for Large-Scale Constrained Optimization, *SIAM Journal on Optimization*, **12**, pp. 979-1006 (2002).
- Sugawara, M., Tank Model, in Computer Models of Watershed Hydrology, *Water Resources Publications*, pp. 164-214 (1995).