

정량강수모의를 이용한 실시간 유출예측

Realtime Streamflow Prediction using Quantitative Precipitation Model Output

강부식* · 문수진**

Kang, Boosik · Moon, Sujin

Abstract

The mid-range streamflow forecast was performed using NWP(Numerical Weather Prediction) provided by KMA. The NWP consists of RDAPS for 48-hour forecast and GDAPS for 240-hour forecast. To enhance the accuracy of the NWP, QPM to downscale the original NWP and Quantile Mapping to adjust the systematic biases were applied to the original NWP output. The applicability of the suggested streamflow prediction system which was verified in Geum River basin. In the system, the streamflow simulation was computed through the long-term continuous SSARR model with the rainfall prediction input transform to the format required by SSARR. The RQPM of the 2-day rainfall prediction results for the period of Jan. 1~Jun. 20, 2006, showed reasonable predictability that the total RQPM precipitation amounts to 89.7% of the observed precipitation. The streamflow forecast associated with 2-day RQPM followed the observed hydrograph pattern with high accuracy even though there occurred missing forecast and false alarm in some rainfall events. However, predictability decrease in downstream station, e.g. Gyuam was found because of the difficulties in parameter calibration of rainfall-runoff model for controlled streamflow and reliability deduction of rating curve at gauge station with large cross section area. The 10-day precipitation prediction using GQPM shows significantly underestimation for the peak and total amounts, which affects streamflow prediction clearly. The improvement of GDAPS forecast using post-processing seems to have limitation and there needs efforts of stabilization or reform for the original NWP.

Keywords : NWP, RDAPS, GDAPS, QPM, streamflow prediction, quantile mapping

요 지

기상청에서 제공하는 강우수치예보정보를 활용하여 10일이내의 중기유량예측을 수행하였다. 기상청의 원시예보자료로는 2일예보를 위한 RDAPS와 10일예측을 위한 GDAPS예측자료를 활용하였다. 수치예보의 정확도를 제고하기 위하여 강우상세정보를 생산할 수 있는 강수진단모형(QPM)과 QPM모의결과에 내재된 계통적 편이를 제거하기 위하여 분위사상과정(Quantile Mapping)을 적용하였다. QPM모의결과를 유출모형의 입력정보로 활용하기 위하여 일관적인 체계를 갖춘 유역강수정보로 변환하여, 장기연속유출모형인 SSARR모형을 이용하여 금강유역내 주요지점에서의 유량예측을 수행하여 유량예측에 대한 검증을 수행하였다. 2006년 1월 1일부터 6월 20일까지 강수예측을 수행한 결과 2일예측인 RQPM의 경우 기간 총강수량을 기준으로 실적강우대비 89.7%의 강수모의값을 보임으로서 양호한 예측성능을 확인할 수 있었다. 유량예측모의에 있어서는 2일예측의 경우 일부 강우사상에서 예측누락과 예측오류가 발생하였지만 전반적으로 유량예측이 양호한 수준이었다. 다만, 하류지점의 경우 조절유량에 의한 유출모형보정의 어려움과 수위-유량관계곡선의 신뢰도저하등의 이유로 예측성능이 떨어지는 경우도 있었다. GQPM에 대한 10일강우예측은 침투강수와 강수총량에 있어서 다소 과소한 모의값을 보이고 있으며, 강수보정효과도 RDAPS에 비하여 저조한 수준이었다. 이 부분은 강수예측의 사후보정으로는 한계가 있는 것으로 보여지며 원시예측모형의 안정화를 통하여 개선할 수 있는 부분으로 판단된다.

핵심용어 : NWP, RDAPS, GDAPS, QPM, 강수진단모형, 유량예측, 분위사상법

1. 서 론

유량예측을 통한 실시간 물관리 운영시스템을 구축하기 위해서는 기상모형(meteorological model)으로부터의 정량적 강수예측을 바탕으로 지리정보, 기상-수문정보를 이용한 수문예측모형(hydrological prediction model)의 결과가 생산될

수 있어야 한다. 기상 모델을 이용한 강수예측의 경우 중규모(mesoscale) 예측으로부터 미세규모(microscale)의 상세기상 모의(meteorological simulation)가 이루어져야 한다. 특히 하천관리나 수자원관리 측면에서 의미있는 유출 정보를 예측하기 위해서는 수 km 스케일이하의 상세한 해상도를 가지는 정량적 강수예측(QPM; Quantitative Precipitation

*정회원 · 교신저자 · 단국대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 (E-mail : bskang@dankook.ac.kr)

**단국대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정 (E-mail : moonsujin@dankook.ac.kr)

Model)기술의 활용이 필요하다.

고해상도 정량적 강수예측 모형과 수문예측모형과의 연계는 선진국에서도 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 미국의 NWS(National Weather Service) 산하의 기후예측 센터(Climatic Prediction Center)에서는 48시간 이내의 단기 강수예보부터 중장기 계절예보까지 수행하여 국내의 수문수자원 관리에 활용토록 자료를 제공하고 있다. 특히, 국립 해양 대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, 이하 NOAA) 산하 환경예측센터(National Center for Environmental Prediction, 이하 NCEP)의 수문기상예측센터(Hydrometeorological Prediction Center, 이하 HPC)는 수문기상관련전문 연구기관으로 CPC에서 생산되는 기상자료와 자체 QPF 모형의 자료를 종합하여 단기, 중기, 장기, 수문예보를 실시간으로 수행하고 있으며, 비 홍수기에는 하루 두 번, 홍수기나 홍수발생 가능기간에는 상시적으로 모형을 수행한다. 유럽중기예보센터(ECMWF; European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)에서는 인공신경망(Artificial Neural Network)을 이용하여 단기 앙상블예보를 하고 있으며, 10 km반경지역내에서의 국지 앙상블모델도 운영하고 있다. 또한, 계절규모의 경우 총 40종의 멤버를 이용하여 앙상블예보를 하고 있으며 6종의 대기-해양 접합 모형을 앙상블시스템에 구축하여 중장기예보에 활용하고 있다. 특히, 유럽에서는 알프스같이 큰 산맥 지역에 중점을 둔 MAP(Mesoscale Alpine Program) 프로젝트를 통하여 지형성 강수, 지역기상모델, 적설용해(snowmelt), 그리고 수문학과와의 연계 등에 관한 연구를 수행하고 있다.

국내에서는 기상청에서 생산중인 강우수치예보자료(Regional Data Assimilation Prediction System; RDAPS, Global Data Assimilation Prediction System; GDAPS)의 수문학적 활용성에 관해서는 최근 활발히 검토된 바가 있다(배덕효 등, 2004; 한국수자원공사, 2004; 김진훈 등, 2005; 강부식 등, 2007). 이들은 강우수치예보와의 유출모형의 연계를 시도하였고, 수문예측을 위한 강우수치예보의 활용성을 입증하는데는 기여하였으나, 동시에 강우수치예보의 본격적 활용을 위해서는 상세강수생성과 오차보정을 위한 적절한 후처리과정이 필요하다는 것을 보여주었다. 기상수치예보 자체를 수km 스케일의 정밀수치모형으로 개발하려는 시도가 기획되고 있지만, 현업의 수치예보모형을 이용하여 수문모형에서 요구되는 미세한 스케일의 국지적인 상세강수예보자료를 생산하기에는 상당한 전산자원과 계산시간을 필요로 하기 때문에 당분간은 현실적이지 못한 대안으로 판단된다. 이들 수치예보자료는 전반적으로 강수가 저평가되는 경향을 보였으나, 강수유무에 대한 정성적 판단은 비교적 정확하였고, 초기의 예보선행시간에서는 강수량예보의 정확성이 증가된다는 예비결론을 제시하고 있다.

이러한 강우수치예보와 연계될 수 있는 후처리모형으로서 소위 QPM(Quantitative Precipitation Model)이라하는 정량 강수예측모형에서는 예보선행시간에 따른 강우수치예보자료의 초기 강우관측소 예보 및 단점을 보완하고 국지적인 대류성 강수예측을 위한 고해상도 지형효과를 고려한 진단적 강수예측 기술이 제시된 바 있다(김옥연 등, 2003). 이는 중규모 수치예보에서 생산되는 기상자료를 기반으로 고해상도

지형자료(3 km 이하의 해상도)를 3차원 대기장에 진단 적용하여, 지형효과에 의한 상승·하강류를 계산하여 대기 중에 존재하는 수증기의 응결증발까지 계산하여 국지역의 강수분포를 재구성하는 방식이다. 이처럼 상세지역의 복잡한 지형효과(Small-scale topography)를 최대한 반영한 강수진단모형은 중규모 모델의 수치예보에 비해 전산운영에 드는 비용 측면에서 매우 경제적인 것으로 평가된다. 현재, QPM 모형의 결과는 기상청에서 추진 중인 중인 디지털 강수예보의 초기단계로서 기상청 3시간 강수예보에서 현업운영 중이며, 유역단위의 소규모 지역 강수예보에 매우 적합한 것으로 평가되고 있다.

본 연구에서는 기상청에서 생산되는 강우수치예보를 이용하여 신뢰성있는 하천유출예측정보를 생산하는 체계를 제시하고자 한다. 강우수치예보모형의 강수와소추정과 지역적 편의(bias)를 보정하기 위하여 정량강수예측모형(QPM; Quantitative Precipitation Model)인 강수진단모형을 기상청 수치예보값인 GDAPS 및 RDAPS 모의값에 적용하여 상세수문스케일에서의 강수예측정보를 생산한다. 수치예보에 내재된 계통적 편이를 제거하기 위하여 분위사상과정(Quantile Mapping)을 적용하였다. 상세화된 강수예측정보를 장기 강우-유출모형에 적용하여 유역내 주요지점에서의 유출량을 실시간 예측하는 기법을 제시하고자 한다. 현재 기상청에서의 강수예보는 강우수치예측과 각종 일기도 및 종관관측자료와 예보관의 전문가적 주관을 근거로한 정성적 예보에 그치고 있으며, 각종 기상예보자료를 이용한 하천의 수문학적 유출예보를 수행할 수 있는 체계가 갖추어져 있지 않다. 본 연구에서 제시하는 하천유출예측시스템은 기상예측과 연계된 수문예측의 수행을 가능케함으로써 수문예측의 신뢰도를 제고하는데 목적이 있다.

2. 정량적 강수진단모형(QPM; Quantitative Precipitation Model)

상세 지역 강수량 예측을 위하여 중규모 수치모형의 결과를 이용하여, 상세 지역의 지형 효과에 의한 정량적 강수량 산출 모형인 강수진단모형은 Misumi *et al.*(2001), Bell (1978), Collier(1975)등이 제안한 바 있는 Collier-type의 QPM모형으로서 이들 모형은 소규모 지형 효과를 고려한 강수량을 산출하는 진단모형이다. QPM은 중규모 예측모형으로부터 계산된 수평 바람, 고도, 기온, 강우 강도, 그리고 상대습도 등의 예측 자료를 이용하고, 중규모 예측모형에서는 잘 표현되지 않는 소규모 지형효과를 고려함으로써 중규모 예측모형에서 생산된 상대적으로 성긴 격자의 강수량 예측 값을 상세 지역의 지형을 고려한 강수량 예측 값으로 재구성하게 된다. 중규모 예측모형의 경우 최소 격자간격이 30 km 정도로 모든 물리적, 역학적 과정을 포함한 모형으로서 모형 구축에 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 계산효율성이 저하될 수도 있다. 반면 QPM은 중규모 모형으로부터 나온 자료를 초기 자료로 이용하고 3 km 간격의 상세 지형을 반영하는 모형으로 소규모 지형 효과를 표현함으로써 상세 지역에서의 강수량 산출과 지형에 따른 강수량의 분포 파악이 용이할 뿐만 아니라 계산 효율성을 개선시킬 수 있다고 소개되고 있다(김옥연 등, 2003). 본 연구에서는 부경대학교

환경대기과학과 지구기후시스템모델링 연구실에서 개발한 강수진단모형을 사용하여 정량강수량을 산정하였으며, 강수진단모형의 주요 역학 과정 및 강수 계산 과정을 간단히 소개하면 다음과 같다.

강수진단모형에서는 물방울의 움직임을 계산하기 쉽도록 지형추적(terrain-following) 좌표계를 사용한다. 대기모형에서 연직층은 지형 및 기압에 따라 결정되는데, terrain-following 좌표계에서는 산악 등 지형의 굴곡을 따라가면서 고도에 따른 기압비율에 따라 연직층을 세분화하는 기법이다. 이때 하부층에서는 지표면의 형태를 따르고 상층부로 갈수록 평평한 것으로 정의한다. 먼저, 단위부피내의 건조공기와 수분입자간의 질량비를 나타내는 물방울 혼합비(mixing ratio), Q_r 을 계산하기 위한 연속 방정식은 식 (1)과 같다(Kessler, 1969).

$$\frac{\partial Q_r}{\partial t} = -u \frac{\partial Q_r}{\partial x} - v \frac{\partial Q_r}{\partial y} - w \frac{\partial Q_r}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho V_r Q_r) + P_1 - E_1 \quad (1)$$

여기서 x, y, z 는 수평 및 연직방향 좌표계, t 는 시간, u, v, w 는 수평 및 연직방향의 풍속성분, ρ 는 공기 밀도, V_r 은 물방울의 낙하 속도를 나타낸다. 그리고 P_1 과 E_1 은 각각 응결률(condensation rate)과 증발률(evaporation rate)이다. 위 식 (1)에서 혼합비(Q_r)의 물리적인 양을 중규모 모형의 중규모 면적평균값(\bar{Q}_r)과 그 밖의 소규모섭동(Q'_r)으로 나눌 수 있고, 이는 식 (2)와 (3)으로 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{Q}_r}{\partial t} = -u \frac{\partial \bar{Q}_r}{\partial x} - v \frac{\partial \bar{Q}_r}{\partial y} - w \frac{\partial \bar{Q}_r}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} [\bar{\rho} V_r \bar{Q}_r] + \bar{P}_1 - \bar{E}_1 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q'_r}{\partial t} = -u \frac{\partial Q'_r}{\partial x} - v \frac{\partial Q'_r}{\partial y} - w \frac{\partial Q'_r}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} [\bar{\rho} V_r Q'_r] + P'_1 - E'_1 \quad (3)$$

위 식에서 이류항(advection)에 포함된 공기 밀도와 풍속성분은 중규모 기상장(mesoscale field)의 공기 밀도와 바람성분으로 근사할 수 있다. 또한 물방울의 종말속도(terminal velocity), V_r 은 평균장과 섭동장으로 구분하지 않고, 중규모 강제력(mesoscale forcing)에 의해 생성된 물방울과 소규모 섭동(small-scale perturbation)에 의해 생긴 물방울은 같은 속도로 낙하한다고 가정한다. 그리고 정상상태(steady state)의 대기를 가정하면, 식 (3)은 다음 식 (4)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$0 = -u \frac{\partial Q'_r}{\partial x} - v \frac{\partial Q'_r}{\partial y} - w \frac{\partial Q'_r}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} [\bar{\rho} V_r Q'_r] + P'_1 - E'_1 \quad (4)$$

강수진단모형에서 평균장(\bar{Q}_r)은 강우수치예보모형의 격자

면적평균값을, 섭동장(Q'_r)은 소규모의 지형효과를 고려한다. 평균장으로는 상세화(downscaling)의 대상이 되는 강우수치모형의 모의값이 사용되는데, 본 연구에서는 RDAPS 또는 GDAPS 모의값을 사용하므로 이로 인해 상세화되는 강우값은 RQPM 또는 GQPM으로 정의한다. 섭동장(Q'_r)은 소규모 지형의 강제력에 의한 부가적인 응결율(condensation rate, P'_1)과 증발률(evaporation rate, E'_1)에 의해 발생하는 물방울 혼합비의 편차를 나타낸다. 강수진단모형에서는 일반적인 수치모형과는 달리 격자간의 에너지나 강수입자의 이류적(advective) 흐름은 고려하지 않는 반면, 강우수치모형의 아 격자스케일로 표현되는 미세지형에서의 대류적(convective) 흐름에 의하여 생성되는 강수조건에 의한 추가적 강수값을 계산하므로 강수진단모형에서 사용하는 상세지형의 스케일에 따라 재생할 수 있는 강수값이 영향을 받게 된다. 그러나, 최적의 강수보정값을 재생하는 최적의 상세지형 스케일의 관계는 아직 정확히 규명된 바가 없다. 본 연구에서 강수진단모형은 3 km의 상세지형스케일을 사용하였다. 물론 강수진단모형에서도 충분히 개선되지 못한 부분에 대해서는 분위 사상법(Quantile Mapping)을 통해 2차적 보정을 거침으로서 추가적인 개선과정을 거치도록 하였다.

한 격자내에서의 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{\rho}$ 는 강우수치예보모형에서 얻어지는 값들이므로, 식 (4)에서 $V_r, \bar{Q}_r, P'_1, E'_1$ 가 지형추적(terrain-following) 좌표계 상에서 모수화되면 섭동장에서의 Q'_r 을 얻을 수 있다. 결과적으로 얻고자 하는 강우 강도(rainfall intensity), I 는 아래의 식 (5)로 구할 수 있다. 여기서 얻어진 상세강우 I 는 유역내 소유역 평균강우로 환산되어 강우유출모형의 입력자료로 사용되었다.

$$I = V_r (\bar{Q}_r + Q'_r) \quad (5)$$

3. 분위사상법(QM; Quantile Mapping)

기상변수의 관측값과 모의값간에 계통적 오차(systematic bias)가 존재할 경우 양 자료의 확률분포는 기본 형태가 같더라도 서로 다른 모수를 갖게 된다. 이상적인 모형이 구성되었다면 모형으로부터 모의된 자료는 관측값과 완전한 상관성을 갖거나 유사한 확률분포를 가져야 하나 실제로는 모형의 단순화과정과 입력정보에 내재된 편이(bias)들로 인하여, 모의된 자료는 일정한 계통적 오차를 갖게 되며 이러한 계통적 오차는 모형내부에서 해결하기 용이하지 않은 경우가

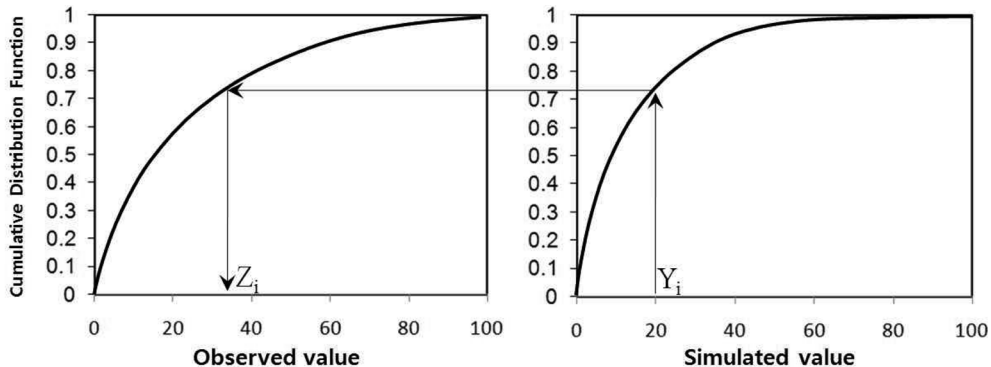


그림 1. 분위기를 이용한 모의자료변환

많다. 따라서 오차보정을 모형의 외부에서 수행하는 경우가 있는데 분위사상법(Quantile Mapping)은 이러한 방법론의 일종으로서 관측값과 모의값이 동시에 존재하는 일정한 과거 기간을 선택하여, 관측값과 모의값의 누적확률분포를 이용하여 모의값의 확률분포를 관측값의 확률분포에 사상(mapping)시키는 방법이다. Y_i 를 i 번째 유역의 기상변수값이라 하면 오차보정된 값 Z_i 는 다음과 같다.

$$Z_i = F_{oi}^{-1}(F_{si}(\hat{Y}_i)) \quad (6)$$

여기서 $F_{si}(\cdot)$ 와 $F_{oi}(\cdot)$ 는 각각 해당변수의 모의값과 관측값에 대한 경험적 확률분포이다.

그림 1은 분위사상법을 이용하여 모의값을 변환하는 과정을 설명하고 있다. 분위사상의 과정을 통하여 변환된 모의값은 결과적으로 관측값과 동일한 확률분포를 가지게 된다. 분위사상법을 이용하여 기상변수를 보정한 예는 Leung *et al.* (1999)나 Wood *et al.*(2002)를 들 수 있으며 전자는 기후변화모의에 후자는 장기수문예측에 각각 적용하였다.

4. QPM을 이용한 중기유량예측

4.1 유량예측시스템 구성

기상청에서 제공하는 RDAPS와 GDAPS 수치예보는 48시간 및 240시간의 강수예측정보로서 강수진단모형을 이용한 상세화과정을 거쳐 RQPM과 GQPM으로 재생산되며, 소유역면적강수로 변환되어 유출모의를 수행하게 된다. 일반적으로 유출량예측은 예측기간에 따라 시간, 일, 순, 월, 계절 예측등을 생각할 수 있다. 이 중 홍수조절등의 치수목적을 위해서는 시간 및 일, 순예측정도가 필요하며, 이수목적을 위해서는 순 및 월예측이 필요하다. 계절이상의 예측은 기쁨에 대비한 물관리에서 활용할 수 있으나 기상정보의 특성상 계절이상의 예보는 신뢰성이 현저히 떨어지게 되므로 현업에서 적극적으로 활용하기는 다소 무리가 있다고 보여진다. 따라서 월이하 예측이 현업에서 활용할 수 있는 기상정보라 판단하고 이를 위한 유출량예측시스템을 구성하였다.

현재 유량예측을 위하여 가용한 기상예측정보는 RDAPS를 상세화시킨 RQPM, GDAPS를 상세화시킨 GQPM이 있으며, 예측기간에 따른 유량예측정보는 이들 정보를 적절히 조합시켜 유출모형의 입력정보로 활용하게 된다. RDAPS와 GDAPS는 각각 지역기상모형과 전구기상모형으로서 원스케일은 각각 30 km와 200~250 km의 공간해상도를 가지나 강수진단모형을 이용한 후처리를 거친후 3 km의 동일한 해상도를 갖게 된다. RQPM의 원시정보는 48시간까지의 3시간 누적강수를 제공하며, GQPM의 원시정보는 240시간까지의 6시간 누적강수를 제공하고 있다. 따라서 SSARR 유출모형의 입력자료로의 활용을 위하여 정량적 강수예측결과를 소유역면적강수로 변환하며, 시간적으로는 일누적강수로 변환하여 RQPM과 GQPM간 일관된 포맷을 유지하였다.

4.2 강우-유출모의

강우-유출모의는 장기유출모형인 미공병단의 SSARR(Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation)모형을 기반으로 수행되었다. SSARR모형은 미국공병단에서 1956년

처음 개발되어 지속적으로 보정이 이루어지고 있는 모형으로서 저수지조작, 대유역의 실시간 일유출예보 등의 목적으로 사용된다(USACE, 1987). SSARR모형은 유역추적모형, 하도추적모형 그리고 저수지운영모형을 포함하고 있으며, 강우와 강설과정을 모의할 수 있다. 일체형 매개변수모형으로서 SMI(Soil Moisture Index), ETI(Evapotranspiration Index), BII(Baseflow Infiltration Index)등 24개 이상의 매개변수를 시행착오법에 의해 최적값을 찾도록 되어 있으며 계산시간간격은 6분에서 24시간까지 중에서 선택할 수 있다(과학기술부, 한국수자원공사, 2004).

SSARR모형도 유효강우와 손실의 구분, 직접유출과 기저유출량 산정, 지표수유출과 복류수유출량 산정에 대한 고유의 알고리즘을 가지고 있다. 먼저 강수가 발생하면 이를 강우와 강설로 구분하여 강설은 융설과정에 의하여 유출량을 산정하게 되고, 강우량은 지표에 떨어져서 SMI(Soil Moisture Index)에 따라 일부는 유출되고 나머지는 토양수분의 증대에 기여하게 되며 일부는 증발에 의하여 손실되기도 한다. 유출량은 BII(Baseflow Infiltration Index)에 의해 직접유출과 기저유출로 구분된다. 직접유출량은 다시 S-SS(Surface-Subsurface Separation)에 의해 지표수유출과 복류수유출로 구분되며, 기저유출은 LZ(Lower Zone)에 의해 지하수유출과 회귀 지하수유출로 나뉘게 되어 4가지의 유출량이 각각 독립적으로 산정되어 유역추적방법에 의해 하도로의 유입량이 된다. SSARR모형에서 유역과 하도모형에서 채택하고 있는 기본적인 추적방법은 Nash형과 유사한 "Cascade of linear reservoir" 방법으로서, 홍수파가 연속된 일련의 저수지를 통과함으로써 평행이동 및 지체효과를 갖게되는 방법이다.

수문모형에서 설정되는 매개변수는 크게 물리적 매개변수, 수문기상 매개변수, 그리고 내부처리 매개변수로 구성되어 있다. 물리적 매개변수는 유역분할과 티센계수, 고도별 면적비, 방류량설정에 관한 저수지 특성자료들이 있고, 수문기상 매개변수로는 유역가중평균강우(PP), 유역가중평균온도(TA), 증발산 지수(ETI), 강우강도별 잠재증발산 보정계수(EKE), 비보정 유역잠재증발산(ETP), SMI별 ETI 보정계수(DKE), 고도별 ETI 보정계수(ETEL), 월별 ETI 보정계수(ETMO) 등이 있다. 내부처리 매개변수로는 토양습윤상태별 유출율(SMI-ROP), 침투량별 지하수 유입률(BII-BFP), 지표수와 복류수 분리(S-SS), BII의 저류시간(BIITS), 최대 BII(BIIMX)와 최대 지하수 유출율(BFLIM), 지하수중 회귀지하수가 차지하는 비율(PBLZ)와 유역추적 및 하도추적 매개변수들이 있다. 내부처리 매개변수중 유출에 가장 민감하게 작용하는 매개변수는 SMI-ROP, BII-BFP, 그리고 S-SS등이며 나머지 매개변수들의 유출에 미치는 영향은 상대적으로 미미하다(USACE, 1987). 한국수자원공사에서는 1983~2005년 사이의 금강유역 유량관측 결과를 토대로 프론티어 지속가능한 확보 기술개발과제(과학기술부, 한국수자원공사, 2004)에서 SMI-ROP, BII-BFP, S-SS 등의 매개변수값을 추정한다. 본 연구에서는 프론티어과제의 성과를 그대로 활용하였다.

SMI-ROP(Runoff Percent)는 SSARR매개변수중 유출에 가장 민감한 영향을 미치는 매개변수중 하나이며 유역내 토양습윤상태에 따른 유출율을 산정하기 위한 매개변수로서 강

표 1. 소유역별 SMI-ROP (과학기술부, 한국수자원공사, 2004)

SMI (cm)	ROP(%)		
	SMI-(a)	SMI-(b)	SMI-(c)
0	10	12	15
1	20	20	20
2	55	34	42
3	85	55	50
4	95	80	65
5	99	90	76
8	100	98	95
12	100	100	100
999	100	100	100

표 2. 소유역별 BII-BFP (과학기술부, 한국수자원공사, 2004)

BII (cm/day)	BFP(%)		
	BII-(a)	BII-(b)	BII-(c)
0.0	50	55	70
1.0	18	30	55
1.5	9	18	45
2.0	6	10	40
2.5	5	8	38
3.0	4	7	37
5.0	3	6	36
100.0	2	5	35

우에 의해 발생 가능한 총 유출율을 결정한다. 한국수자원공사에서는 1983~2005년 사이의 금강유역 유량관측 결과를 토대로 한 대표 SMI-ROP를 산정하였으며 용담댐상류(a), 용담댐~대청댐(b) 및 대청댐하류(c) 소유역에 대한 대표값이 표 1에 제시되어 있다.

BII-BFP(Baseflow Percent)는 SMI-ROP에 의해 산정된 총 유출량을 직접유출과 기저유출로 분리하기 위한 매개변수로서 침투량에 따른 기저유출비율을 결정한다. SMI-ROP와 마찬가지로 1983~2005년 사이의 유량관측결과를 토대로 한 BII-BFP의 대표치를 용담댐상류(a), 용담댐~대청댐(b) 및 대청댐하류(c) 권역에 대해 산정한 결과가 표 2이다.

S-SS(Surface-Subsurface Separation)는 BII-BFP에 의해 분리된 직접유출과 기저유출중 직접유출에 대해 지표유출과 지표하유출로 분리하기 위한 매개변수로서 직접유출율의 변화에 따른 지표하 유출율을 결정한다. S-SS는 홍수기에서의 단기유출에 대한 특성을 반영하는 매개변수로서 치수를 목적으로 분석시에 중요한 매개변수이다. 대청댐 상류(a)와 하류유역(b)에 대한 매개변수 대표값은 표 3과 같다.

금강유역에 대한 SSARR모형은 21세기 프론티어 지속가능한 수자원확보기술개발사업단의 연구과제로 한국수자원공사에서 구축하였다. 본 유출모형에서는 금강수계의 유역을 12개의 소유역으로 분할하였으며 131개의 강우관측소를 통해

표 3. 소유역별 S-SS (과학기술부, 한국수자원공사, 2004)

직접유출율 (cm/hr)	지표유출성분(cm/hr)	
	S-SS-(a)	S-SS-(b)
0.0	0.00	0.00
0.5	0.05	0.15
1.0	0.39	0.57
1.5	0.89	1.07
2.0	1.39	1.57
2.5	1.89	2.07
3.0	2.39	2.57

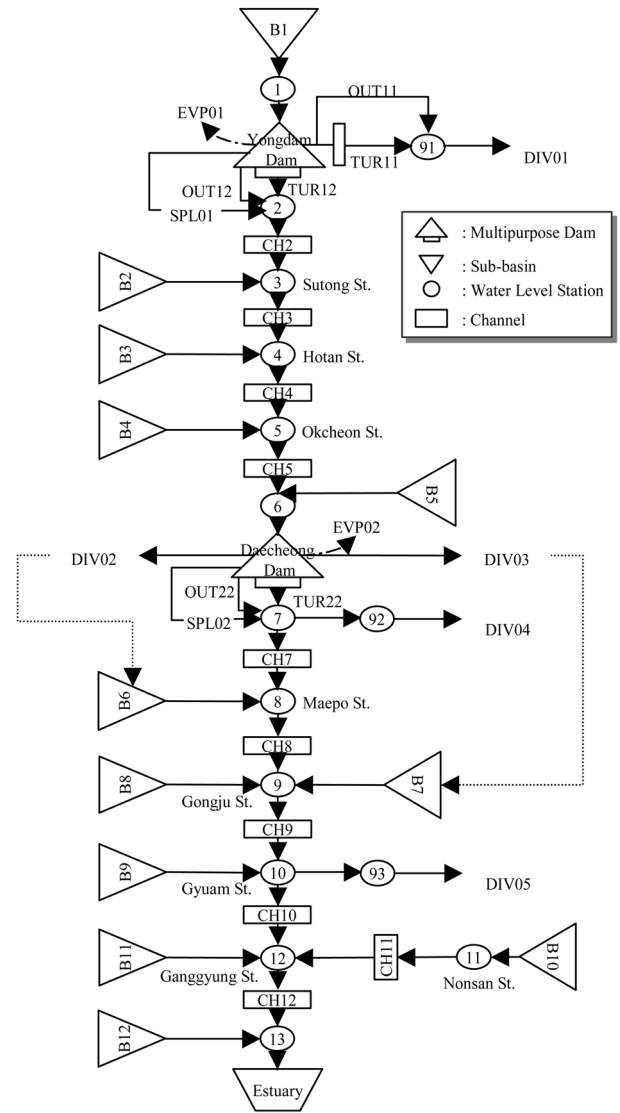


그림 2. 금강유역 SSARR모형 모식도(과학기술부, 한국수자원공사, 2004)

강우자료를 수집하도록 구성되었다. 또한 12개의 하도구간과 24개의 절점으로 구성하였으며, 절점중 13개지점에 대해서는 유량관측소지점을 선택하였다(그림 2). SSARR모형에 입력될 소유역과 하도 및 댐의 네트워크는 그림 2에 나타내었다. 모형구축당시 매개변수의 보정은 1997년과 1998년에 대하여 수행되었으며, 보정결과 대청댐 상류는 비교적 만족할 만한 결과를 얻었으나 공주이하의 하류지점에 대해서는 홍수기의 경우 다소 불안정한 모의양상을 보여주고 있는데, 이는 강우량의 불확실성 또는 수위-유량곡선의 신뢰도저하를 원인으로 보고 있었다(과학기술부, 한국수자원공사, 2004).

5. 유량예측모의 적용

5.1 정량강수예측 모의

RDAPS와 GDAPS를 합성한 예측자료에 대한 QPM 및 분위사상과정을 거치게 되면 특정일을 기준으로 1일전 예측부터 10일전 예측까지의 예측선행시간이 다른 10가지의 강우예측정보를 가지게 된다. 만일 특정일의 X일예측평균값을 1일전 예측강우부터 X일전 예측강우까지의 평균값이라 정의 하면, 2일예측평균까지는 RDAPS에 대하여 보정된 RQPM

예측값을, 2일부터 X일예측평균까지는 GQPM예측평균값을 의미하게 된다. 다시말해 만일 10일예측평균이라하면 1일부터 2일까지는 RQPM예측평균 그리고 3일부터 10일까지는 GQPM예측평균값을 의미한다. 한편 RQPM과 GQPM에 분위사상과정을 적용한 결과는 RQPM_QM과 GQPM_QM으로 표기하였다.

강우예측의 성과분석은 2006년 1월 1일부터 6월 20일까지의 RQPM과 GQPM예측자료를 가지고 수행되었다. 강수모의는 경계면이 뚜렷한 하천의 유출모의와 달리 개방된 공간에서의 시공간적 모의를 수행하기 때문에 특정지점에서의 발생특성보다는 면적에서의 발생특성을 비교해야 한다. 다시말해, 유출량을 비교할 때에는 관측수문곡선과 모의수문곡선, 즉, 관측과 모의에 대한 시계열값에 대하여 매시간 혹은 매일의 bias에 대한 absolute error 혹은 RMSE를 비교하여 모의값을 검증하는 것이 일반적이다. 이는 모의수문곡선의 침투값과 침투시간 그리고 총누기유출량등을 모형매개변수의 검보정을 통해서 조정할 수 있기 때문에 가능하다. 하지만, 강우모의를 위한 대기모형에 있어서 강수발생대역의 시공간적 보정을 강우-유출모형과 같이 정밀하게 하는 것은 불가능하다. 따라서 전체적인 패턴은 관측을 무난히 따라가고 있는데도 불구하고 특정지점에서의 편의(bias)특성은 매우 저조하게 나오는 경우가 흔히 발생하게 된다. 이와 같은 이유로 강우모의에 대한 검증은 강수의 유무를 맞추는 적중률(hit score)이라든지 특정기간을 설정하고 그 기간중의 강수발생 총량으로 검증을 하는 것이 흔히 사용하는 방법이다.

QPM과 실적강우는 모두 용담댐유역의 면적평균강우로 환산하여 동일한 조건에서 비교하였지만 수치예보가 실적강우에 비하여 강수의 침투량에 대한 모의능력은 다소 떨어지는 경향을 보인다. 각 정량강우예측의 기간내 총강우에 대한 정량적 비교는 표 4에서 확인할 수 있다. 대상기간인 2006년 1월 1일부터 6월 20일까지 관측강우는 총 391.5 mm 였으며, 10일예측평균은 153.8 mm로서 관측강우의 절반에 훨씬 못미치고 있으며, 분위사상과정으로 보정하면 223.2 mm로서 69.4 mm 증가하게 되나 여전히 실적강우에 크게 못미치고 있다. 따라서 10일예측평균은 침투강수 모의능력뿐만 아니라 기간내 총강수량에 대해서도 상당히 과소산정하고 있음을 알 수 있다. 이는 10일예측을 구성하고 있는 GQPM의 강수예측이 수치적으로 불안정한 상태라는 것을 짐작할 수 있게 한다. 이에 대해서는 여러 가지 원인을 생각해 볼 수 있지만 현재로서는 QPM모형이나 하드웨어 시스템의 문제라기 보다는 GQPM의 입력정보가 되는 GDAPS의 오류가 중요한 원인으로 추정하고 있다.

반면 2일예측평균의 경우는 실적강우에 비하여 119.5 mm 정도 과소산정하고 있으나 분위사상과정을 거치게 되면 351.7 mm로서 실적강우와 10.2%의 편차를 보이고 있다. 이는 강우예측의 정확도 측면에서는 고무적인 결과로 볼 수

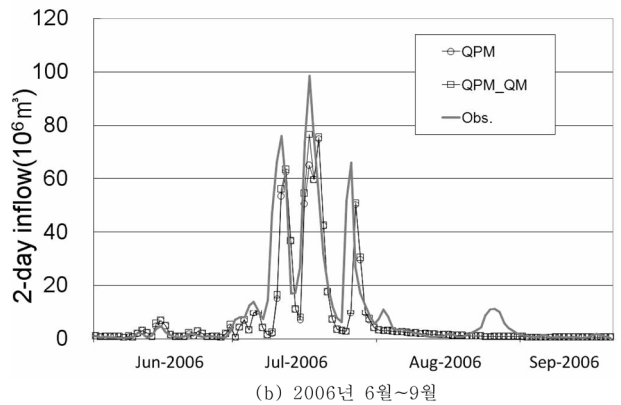
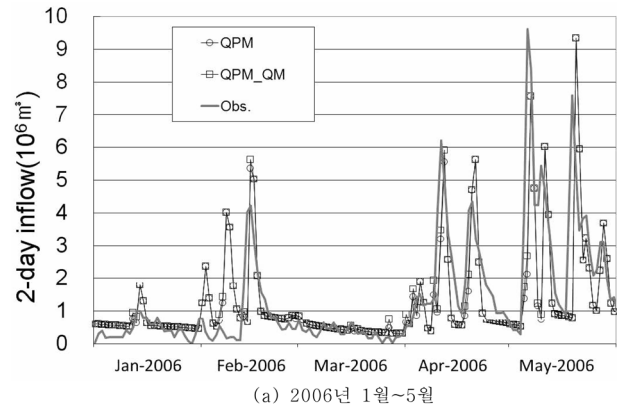


그림 3. RQPM을 이용한 용담댐지점 2일예측 수문곡선

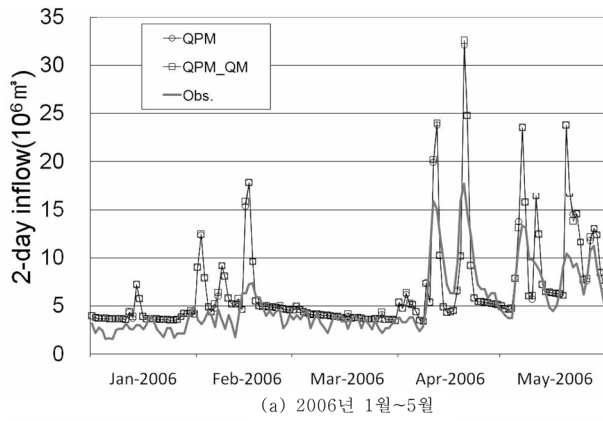
있으며 현업에서의 활용성이 기대되는 수준이라 볼 수 있다. 다만, 본 연구로부터 RDAPS모의가 GDAPS모의보다 정확도에서 앞서있다는 것은 확인하였는데, RDAPS내부 혹은 GDAPS내부에서 예측선행시간이 짧을수록 신뢰도가 높다는 것은 정량적으로 확인할 수 없었다. 이 부분에 대해서는 추가적인 연구가 필요한 부분이라 보이며, 본 연구에서는 선행시간별 균등가중값을 적용하여 예측모의의 조합을 구성하였다.

RQPM과 GQPM의 정량강수예측을 이용한 2일 및 10일 유출예측은 금강유역내의 주요 수위관측지점인 용담댐, 대청댐, 공주, 규암지점에 대하여 장기유출모형인 SSARR모형을 이용하여 수행되었다. 유량예측에 대한 분석기간은 2006년 1월 1일~9월 20일이며, 이 기간중 홍수기와 비홍수기의 유출 패턴의 상이함을 고려하여 기간을 1월~5월과 6월~9월의 두 기간으로 나누어 유출수문곡선을 작성하였다.

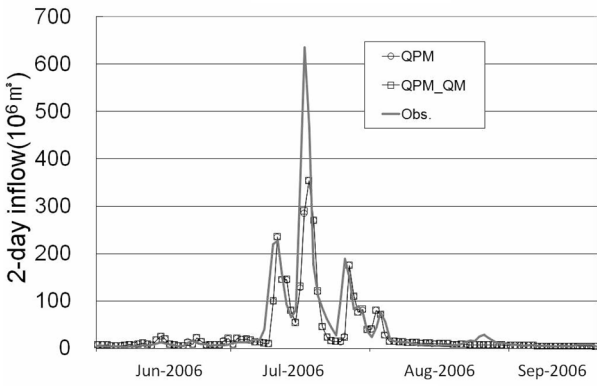
용담댐유역은 금강유역의 최상류유역으로서 유역면적(930 km²)도 작은 편이고, 유역내 수공구조물이 없어 자연유량이 비교적 양호하게 보존되어 있을뿐 아니라 장기간 시험유역으로서 관리될 정도로 수위-유량관계곡선이나 각종 수문지형학적 유역특성에 관한 자료가 충분히 축적되어 있는 유역이다. 그림 3에는 RQPM을 이용한 용담댐지점 2일예측 수문곡선이 제시되어 있다. 1월~5월의 저수위(low flow)기간과

표 4. 정량적 강수예측 결과비교

2006.1.1~2006.6.20	QPM		QPM (분위사상보정)		관측강우
	2일예측평균	10일예측평균	2일예측평균	10일예측평균	
누적강수 [mm]	272.4	153.8	351.7	223.2	391.5
모의값과 관측값의 편차 [%]	30.4	60.7	10.2	43.0	-

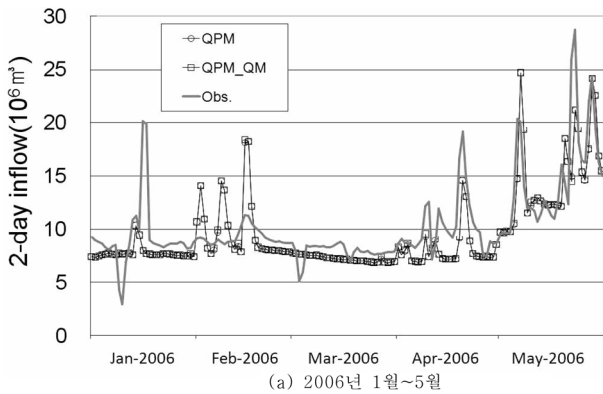


(a) 2006년 1월~5월

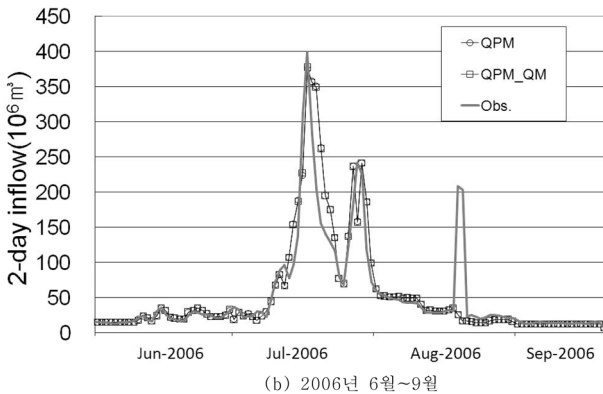


(b) 2006년 6월~9월

그림 4. RQPM을 이용한 대청댐지점 2일예측 수문곡선



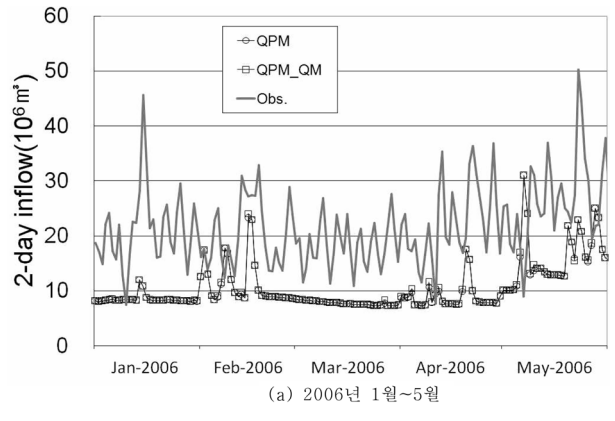
(a) 2006년 1월~5월



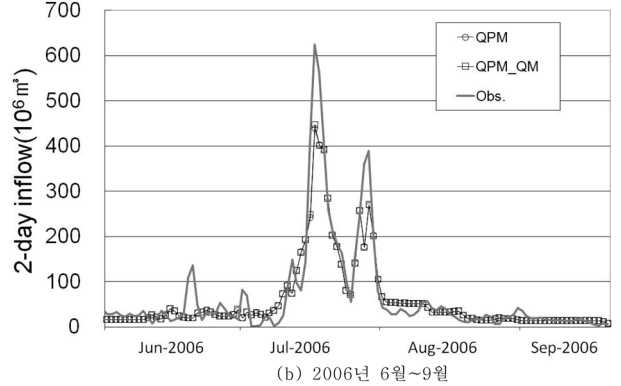
(b) 2006년 6월~9월

그림 5. RQPM을 이용한 공주지점 2일예측 수문곡선

6월~9월의 고수위(high flow)기간 모두 예측유량이 관측유량을 양호하게 따라가고 있다. 특히 저수위기간의 기저유출이나 고수위기간중의 강우사상에 대한 침투유량모의도 비교적 양호하게 이루어져 있다. 대청댐의 경우에도 용담댐과 마찬가지로 저수위기간과 고수위기간의 유량예측이 비교적 관측



(a) 2006년 1월~5월



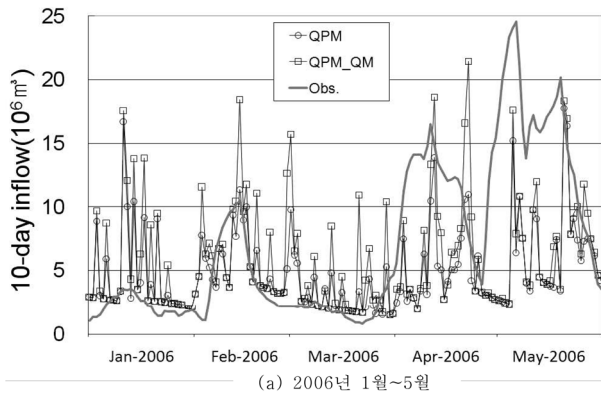
(b) 2006년 6월~9월

그림 6. RQPM을 이용한 규암지점 2일예측 수문곡선

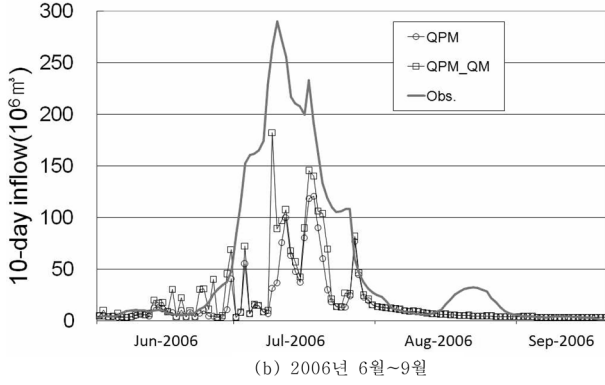
유량을 잘 따라가고 있으나, 7월 중반의 강우사상에서는 침투유량의 예측에서 과소추정이 발생하였다(그림 4). 이는 일강우자료를 사용하는 장기연속유출모형에서 홍수량모의시 흔히 나타나는 현상으로서 현업에서 활용시는 홍수모의를 위한 홍수유출모형을 별도로 구동하여 예측의 정확도를 확보하는 노력이 필요할 것으로 사료된다.

공주와 규암지점은 대청댐의 하류지점으로서 유역의 중하류지점이기 때문에 조절유량이 상당부분 포함되어 있고 하폭과 단면이 커짐에 따라 수위-유량관계곡선의 신뢰도가 상대적으로 미흡한 지점이다. 그러나 QPM 유량예측수문곡선을 보면 공주지점의 경우 상류의 용담댐 및 대청댐 지점과 마찬가지로 상당히 양호한 결과를 보여주고 있지만, 1월과 2월에서 예측누락(missing forecast)과 경보유류(false alarm)가 있었고, 8월 중순에도 예측누락이 있었다(그림 5). 규암지점의 경우 금강유역의 주요지점 중 유량신뢰도가 가장 떨어지는 지점으로 알려져 있는데, 유출모의결과 1월~5월의 관측 유량변동의 변동성이 상당히 높은 경향을 보여주었고 모의 유량의 기저유출이 관측치와 다소 편차를 보여주고 있다(그림 6). 그러나 이는 홍수기와 비홍수기의 수문곡선을 함께 고려해보면 비홍수기의 기저유출오차는 홍수기의 홍수량편차에 비하여 거의 무시할 수 있는 수준으로 판단된다. 규암지점의 홍수수문곡선예측도 침투부분의 과소추정을 제외하면 전체적인 패턴은 관측치를 양호하게 따라가는 것으로 판단된다.

GQPM을 이용한 유량예측의 경우 강우예측에서도 보았듯이 RQPM에 비하여 신뢰도가 현저히 떨어지는 결과를 보여준다. 용담댐지점의 경우 기저유출부분은 변동성이 과다함에도 불구하고 전체적으로는 관측값을 따라가는 추세를 보이고 있으나 7월중의 홍수량은 상당한 과소추정의 경향을 보

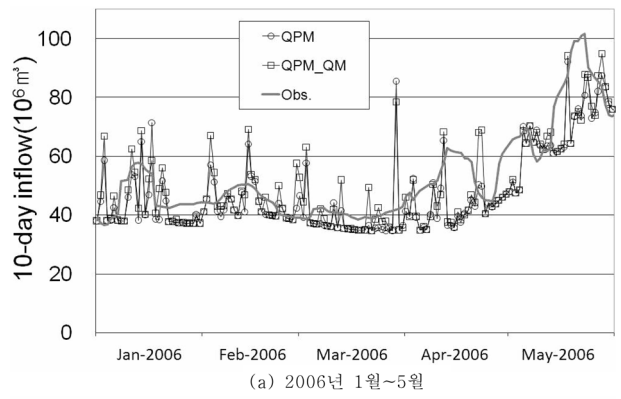


(a) 2006년 1월~5월

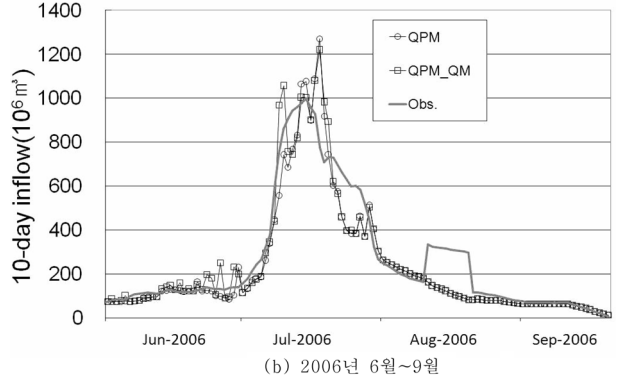


(b) 2006년 6월~9월

그림 7. GQPM을 이용한 용담댐지점 10일예측 수문곡선

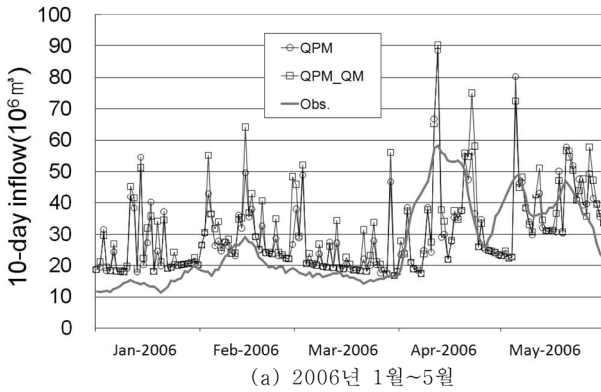


(a) 2006년 1월~5월

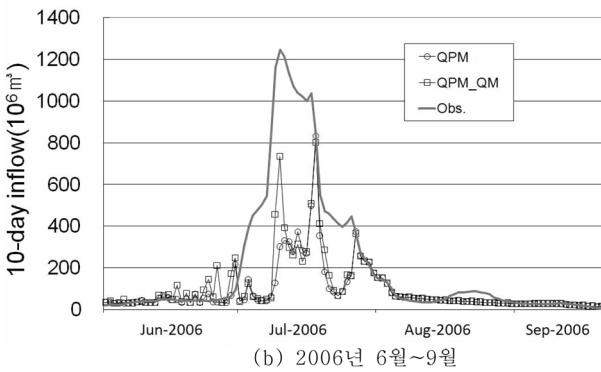


(b) 2006년 6월~9월

그림 9. GQPM을 이용한 공주지점 10일예측 수문곡선

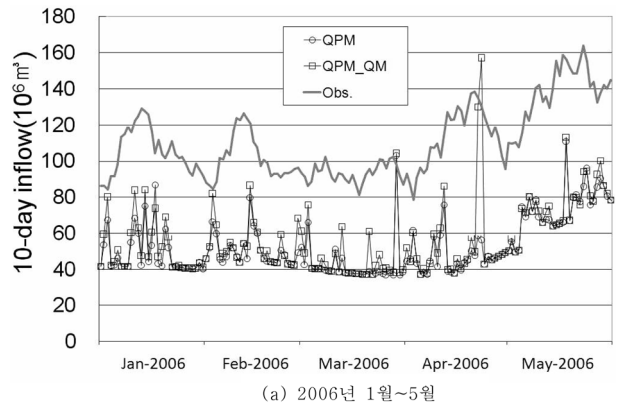


(a) 2006년 1월~5월

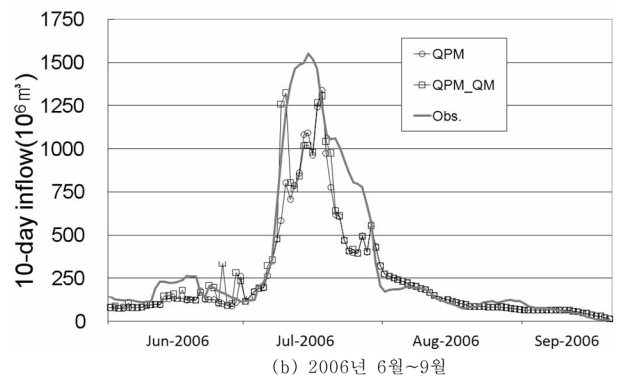


(b) 2006년 6월~9월

그림 8. GQPM을 이용한 대청댐지점 10일예측 수문곡선



(a) 2006년 1월~5월



(b) 2006년 6월~9월

그림 10. GQPM을 이용한 규암지점 10일예측 수문곡선

여주고 있다(그림 7). 오히려 대청댐지점과 공주지점의 경우 용담댐보다 홍수수문곡선을 잘 따라가는 패턴을 보여주었다(그림 8, 9). 규암지점의 GQPM 유량예측의 경우 RQPM 유량예측과 마찬가지로 1월~5월중의 기저유출모의부분에서 관측값과 편차를 보이고 있으며 홍수유량예측에서 다소간의 과소예측을 보여주었다(그림 10).

금강유역정도규모이상의 대유역은 다목적댐등 복잡한 수리

구조물을 운영하고 있기때문에 정확한 유출모의를 위해서는 댐의 운영을 반영한 유출모의를 수행해야 한다. 모형의 매개변수 검토정과정에서는 용담댐과 대청댐의 실제방류량을 가지고 매개변수보정을 수행하는데, 이는 조절된 유량이기 때문에 자연하천유역의 정확한 매개변수값을 찾는 데 어려움을 주는 원인이 되기도 하지만, 시간위모의가 아닌 일단위모의이기때문에 조절흐름의 영향이 크지 않다고 보았다. 이러

한 문제 때문에 유역물수지모형인 MODSIM과 같은 모형에서는 후방추적(back-routing)기법을 사용하여 이러한 문제를 해결하는 장치를 두고있으나, SSARR모형에서는 이러한 부분에 대한 특별한 개선기능을 갖고 있지 않다.

6. 결 론

기상청에서 생산되는 강우수치예보를 이용하여 신뢰성있는 하천유출예측정보를 생산하는 체계를 제시하고자 하였다. 현재 기상청의 원시예보자료는 2일예측을 위한 RDAPS와 10일예측을 위한 GDAPS자료이다. 수치예보의 정확도를 제고하기 위하여 강우상세정보를 생산할 수 있는 강수진단모형(QPM)과 QPM모의결과에 내재된 계통적 편이를 제거하기 위하여 분위사상과정(Quantile Mapping)을 적용하였다. 상세화된 강우예측정보를 장기 강우-유출모형인 SSARR에 적용하여 유역내 주요지점에서의 유출량을 실시간 예측하는 기법을 제시하고자 하였다.

1. 2006년 1월 1일부터 6월 20일까지 강수진단모형(QPM)에 의한 수치예보의 보정과 소유역별예보선행시간별 누적확률분포를 산정하여 분위사상(Quantile Mapping)을 수행하였다. 그 결과 RQPM의 경우 기간 총강수량을 기준으로 실적강우대비 89.7%의 강수모의값을 보임으로서 양호한 예측성능을 확인할 수 있었다. 그러나 GQPM의 경우는 강수진단모형과 분위사상을 통하여 원시예측대비 45.1%의 강우증가를 보였으나 여전히 실적강우에 비하여 43.0% 과소추정을 보임으로서 정량강우예측의 한계를 보여주었다.
2. 유량예측모의에 있어서는 2일예측의 경우 일부 강우사상에서 예측누락과 예측오류가 발생하였지만 전반적으로 유량예측이 양호한 수준이었다. 다만 규암지점의 경우 기저유출에 있어서 모의값과 관측값에 편차가 발생한 것은 규암지점의 유량관측이 불안정한 신뢰도를 보여왔다는 점을 상당부분 감안하여야 하며, 따라서 유량관측의 신뢰도와 함께 판단해야할 부분이라 보여진다.
3. GQPM에 대한 10일 강우예측은 침투강수와 강수총량에 있어서 지나치게 과소한 모의값을 보이고 있으며, 따라서 유량예측도 강우예측과 마찬가지로 전반적으로 과소모의 경향을 보이고 있다. 이 부분은 강수예측의 사후보정으로 는 한계가 있는 것으로 보여지며 원시예측모형의 안정화 작업이 필요하다고 판단된다.
4. 구축된 SSARR모형은 일자료를 이용한 일단위 장기연속 유출모형으로서 QPM의 결과값은 일단위로 변환되어 일 유출모의에 사용되었다. QPM의 원시결과값은 RQPM의 경우 3시간 누적강수, GQPM의 경우 6시간 누적강수라는 점을 감안하여 이에 준하는 시간분해능을 갖는 유출모의가 이루어진다면 더욱 정밀한 유량예측이 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 연구는 2008년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었습니다. 강수진단모형의 모의자료를 제공해주신 부경대학교 환경대기과학과 지구기후시스템모델링연구실에 감사드립니다.

참고문헌

- 광부식, 유승엽, 고익환(2007) 강수전망 가중양상블을 이용한 장기 확률유량예측, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제2B호, pp. 183-191.
- 과학기술부, 한국수자원공사(2004) 실시간 물관리 운영시스템 개발, 21세기 프론티어 「수자원의 지속적 확보기술개발 사업」
- 김옥연, 이한세, 김태국, 오재호, 정관영(2003) QPM(Quantitative Precipitation Model)을 이용한 단기강수량 예측, **한국기상학회지**, 한국기상학회, Vol. 13, No. 1, pp. 450-453.
- 김진훈, 윤원진, 배덕효(2005) 단기예측강우를 활용한 실시간 유량예측기법의 적용, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제1호, pp. 11-23.
- 배덕효, 정창삼, 권원태(2004) 수자원활용측면에서의 고해상도 GCM모의의 효용성, **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제40권, 제4호, pp. 409-418.
- 한국수자원공사, 건설교통부(2004) **유역통합물관리를 위한 하천유출량 예측방안 연구**, 연구보고서, 한국수자원공사.
- 한국수자원공사(2004) **정량적 강우예측을 이용한 실시간 저수지유입예보시스템 개발(1차년도)**, 연구보고서, 한국수자원공사.
- Bell, R.S. (1978) The forecasting of orographically enhanced rainfall accumulations using 10-level model data, *Meteor. Mag.*, 107, pp. 113-124.
- Collier, C.C. (1975) A representation of the effects of topography on surface rainfall within moving baroclinic disturbances, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, Vol. 101, pp. 407-422.
- Kessler, E. (1969) On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations, *Meteor. Monogr.*, Vol. 10, No. 32, Amer. Meteor. Soc., pp. 1-84.
- Leung, L.R., Hamlet, A.F., Lettenmaier, D.P., and Kumar, A. (1999) Simulations of the ENSO hydroclimate signals in the Pacific Northwest Columbia River Basin, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 80, pp. 2313-2328.
- Misumi, R., Bell, V.A. and Moore, R.J. (2001) River flow forecasting using a rainfall disaggregation model incorporating small-scale topographic effects, *Meteorological Applications*, Vol. 8, pp. 297-305.
- U.S. Army Corps of Engineers (1987) *SSARR User's Manual*, North Pacific Division, Portland, Oregon.
- Wood, A.W., Maurer, E.P., Kumar, A., and Lettenmaier, D.P. (2002) Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, Vol. 107, pp. 4429, doi:10.1029/2001JD000659.

(접수일: 2010.5.3/심사일: 2010.7.19/심사완료일: 2010.9.11)