韓國水資源學會論文集
第38卷 第1號 · 2005年 1月
pp. 11~23

단기 예측강우를 활용한 실시간 유량 예측기법의 적용

Real-Time Application of Streamflow Forecast Using Precipitation Forecast

김 진 훈* / 윤 원 진** / 배 덕 효***
Kim, Jin Hoon / Yoon, Won Jin / Bae, Deg Hyo

Abstract

The objective of this study is to develop a short-term precipitation-streamflow coupling method for real-time river flow forecast. The coupled method is based on the RDAPS model for precipitation and atmospheric simulation and the SFM model for streamflow simulation. The selected study area is the 2,703-km^2 Soyang River basin with outlet at Soyang dam site. The rainfall-runoff event from 18 to 24 July 2003 is selected for the performance test of predicted precipitation and streamflow. It can be seen that the simulated basin-scale precipitation from the RDAPS can be useable as an input for SFM hydrologic model. Short-term hydrometeorological simulations using the RDAPS and SFM model were well captured important hydrometeorological characteristics in this study area. It is concluded that atmospheric precipitation forecast would be useful for streamflow forecast.

Keywords : precipitation-streamflow coupling method, short-term, real-time, RDAPS, SFM

요 지

본 연구에서는 단기 예측강우를 활용하여 실시간 유량을 예측할 수 있는 기상-수자원 연계기법을 개발하였다. 이를 위해 기상청의 RDAPS 강수자료와 저류함수(SFM) 모델을 통해 소양강댐 상류유역의 댐유입량을 계산하고 그 정확도를 분석하였다. 대상 사례기간인 2003년 7월 18일부터 2003년 7월 24일까지 RDAPS 강우예측자료의 정확도를 평가한 결과 RDAPS 및 관측 강수량 사이의 정성적 평가에서 매우 우수한 정확도를 보이고, 수자원 측면에서 필요한 정량적 성격을 충족시키는 것으로 나타났다. RDAPS-SFM 연계기법을 통한 하천유량 계산에서도 그 정확도가 비교적 높은 것으로 검토되어 현재의 하천 유량 예측에서 기상 수치예보자료의 활용성은 매우 높은 것으로 사료된다.

핵심용어 : 기상-수자원 연계기법, 단시간, 실시간, RDAPS, 저류함수모델

1. 서 론

홍수와 같은 재해를 사전에 방지하고 상류유역에서의 댐유입량을 사전에 예측하기 위한 기존의 홍수예측 시스템은 강우 실관치를 모형의 입력자료로 홍수유출을 계산하는데, 돌발홍수가 발생할 수 있는 악기상 조건에서는 강우가 관측될 때 이를 이용하여 유출계산을 수행하고 그 결과 위험하다고 판단될 때 홍수예경보를

* 세종대학교 토목환경공학과 박사과정
Graduate Student, Dept. of Civil & Envirn. Engrg., Sejong University, Seoul 143-747, Korea
(e-mail: jhcnu@chol.com)
** 세종대학교 토목환경공학과 석사졸업(현 (주) 웹솔루스 사원)
M.S., Dept. of Civil & Envirn. Engrg., Sejong University, Seoul 143-747, Korea
(e-mail: ywonjin@nate.com)
*** 세종대학교 수운연구소 · 토목환경공학과 부교수
Associate Professor, Dept. of Civil & Envirn. Engrg., Waterway Research Institute, Sejong University, Seoul 143-747, Korea (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

하기 위해서는 시간이 매우 촉박하기 때문에 어느 정도 한계성을 지니고 있다. 이와 같은 상황에서 정확한 기상예보를 활용한 기상-수자원 연계기법을 개발하여 홍수예경보 시스템에 적용한다면 악기상 감시예측기술의 향상과 더불어 재해의 방지차원에서 매우 유용한 대책이 될 것이다.

최근 국내 기상청의 경우 슈퍼컴퓨터의 도입과 기상분야의 지속적 연구성과의 향상으로 단기, 중기, 장기예보 등 예측기간별 수치 및 통계 강우예보자료의 정확도가 매우 향상되었다. 특히, 일반인을 대상으로 수행되는 생활 기상예보는 3시간 및 단기예보(육상예보, 기상개황, 산악예보, 고속도로예보, 해상예보 등), 주간예보의 중기예보, 1개월, 계절, 6개월 장기예보 등이 주기별로 생산되어 일상생활에서 매우 귀중한 정보로 활용되고 있다. 이러한 정보들을 수자원 분야에 적용할 수 있는 방안을 모색하고 그 활용성을 극대화 시킨다면 수자원 분야의 치수기 홍수예측과 함께 이수기 댐운영 계획 수립 등에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

국외의 경우 기상예보 분야가 가장 발달한 미국은 기상-수자원 연계기법을 통한 예측 산출물들을 인터넷을 통해 제공하고 있다. 일례로, 정량적 강수량예보(QPF)를 통한 단·중기 하천유출량 예측, 앙상블 예보기법(ESP)과 확률론적 기상 예측자료를 연계한 중·장기 하천유출량 및 댐유입량 예측이 그것이다. 내부적으로 NWSRFS 연속형 수문모델, 정량적 강수량 예보 기법, 통계적 방법에 근거한 확률 기상예보 등의 복잡한 과정을 거치지만 산출결과의 정확도보다는 수자원 활용성에 그 존재가치가 매우 높다고 할 수 있다. 한편, 대기모델 예측자료를 활용하여 유량해석을 수행한 대기-유량 결합모델의 연구가 다수 존재한다(Leavesley 등, 1992; Pereira Fo 등, 1999; Benoit 등, 2000; Bae와 Kim, 2000; Chang 등, 2004). 이러한 연구는 지역적 대기모델의 결과가 하천유출량에 미치는 영향을 검토하기도 하였고(Kim 등, 2000), 기후변화가 지역적 수문순환 및 수자원에 미치는 영향을 검토하기도 하였다(Leavesley 등, 1992; Kim, 2001). 국내의 경우 장기호 등(2002)이 METRI-meso 대기모델을 활용하여 평창강 유역에서의 유출량 해석을 수행하였다.

본 연구의 목적은 기상자료의 수자원 연계기법 개발의 일환으로 기상청의 단기 수치예보자료인 RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System) 강수자료를 활용하여 저류함수(Storage Function Method, SFM) 모델을 통해 소양강댐 상류유역의 실시간 댐유입량을 계산하고 그 정확도를 분석하는데 있다. 이는 기상 및 수자원 각 분야의 현업적 모델을 활용하여 기상-수자원 연계기술 개발에 중점을 두고 시도하는 제반 연구로써 수자원 전문가 입장에서 기상 수치자료의 특성을 분석하고 수자원 분야에 이용될 수 있도록 자료의 정확도 분석 및 활용성을 제공하는데 그 의의를 둘 수 있다.

2. RDAPS 수치예보 모델

기상청의 지역적(regional), 고해상도 단기 예측모델인 RDAPS의 근간은 PSU/NCAR MM5(Pennsylvaina State University/National Center for Atmospheric Research Mesocale Model version 5) V2.11과 V2.12(Grell 등, 1995)이다. RDASP는 슈퍼컴퓨터(NEC SX5/12A)에서 매일 두 번(00, 12UTC) 연산을 수행하며, 191×171×33의 격자시스템에서 평면격자 간격은 30km이다(Kwon 등, 2002).

MM5와 같은 기상 수치모델은 질량 보존(대기, 수분), 에너지 보존, 운동량 보존(x, y, z 방향) 및 이상기체 상태방정식과 같은 물리법칙을 이용하여 대기의 상태를 수식화 한다. 이렇게 수식화된 방정식들은 7개의 연립 편미분방정식으로 존재하므로 3차원 격자점에서 이들의 해를 찾는 다는 것은 엄청난 작업으로 알려져 있다. 따라서 이러한 기본 방정식들은 여러 가정을 통한 단순화 과정을 거치게 되고, 단순화된 방정식들은 수치적분을 통해 근사해를 구하게 된다. 또한 편미분방정식의 해를 구하기 위해서는 방정식에 포함된 강제력(forcing) 항이 아주 중요한 역할을 수행하게 되는데, 이러한 강제력에는 에너지 보존식에 포함된 태양광선과 지구복사, 잠열, 지면에서의 현열 등 비단열과정에 의해 기온에 영향을 주는 인자들이고, 수분의 질량 보존식에 포함된 수증기, 물, 얼음의 상호 변환과정은 강수량 예측에 매우 큰 영향을 미치는 인자들이다. 이와 같은 강제력을 구하는 과정을 일반적으로 물리과정의 모수화(parameterization of physical processes)라고 한다(건설교통부, 2003).

MM5의 이론적 근간은 Anthes와 Warner(1978)에서 시작되었으며, 보다 확장된 개념은 Anthes 등(1987)에 의해 확립되었다. 모형의 구름 물리과정은 simple ice(Dudhia, 1989), 적운모수화는 Kain-Fritsch 방법(Kain과 Fritsch, 1990)이 사용되고 행성 경계층 모수화는 MRF/PBL(Medium Range Forecast/Planetary Boundary Layer) 기법(Hong과 Pan, 1996)을 포함한다. 장파 및 단파 태양복사는 Grell 등(1995)의 기법, Klemp와 Durran(1983)의 상층 경계조건을 사용한다. 모형의 연직 좌표계는 σ 좌표계, 수평 좌표계는 Arakawa-B

격자계(Arakawa와 Lamb, 1977), 지구 투영법은 중위도에서 적합한 것으로 알려져 있는 램버트 컴포말(Lambert Conformal) 좌표체계를 사용한다.

RDAPS 예보자료의 예보 영역은 그림 1과 같으며 30km 격자간격으로 191 × 171 개의 격자수로 이루어져 있다. (1,1)에 해당하는 격자점의 위도는 12.269°N이고, 경도는 102.477°E이다. 자료의 생산은 하루 2번으로 00UTC와 12UTC이며, 3시간 간격의 예보자료로 총 48시간 예보자료를 포함하고 있다. 그림 2는 RDAPS 생산 변수 중 대표적으로 지표면에서의 강수량과 기온의 예를 나타낸 것이다.

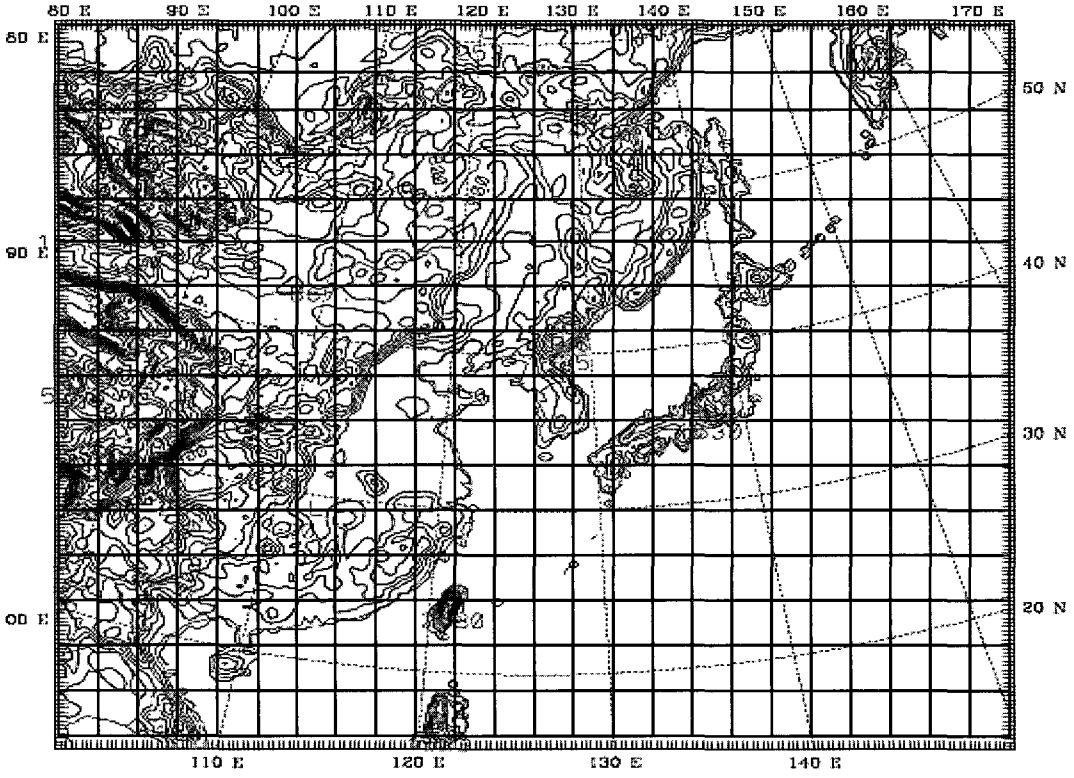
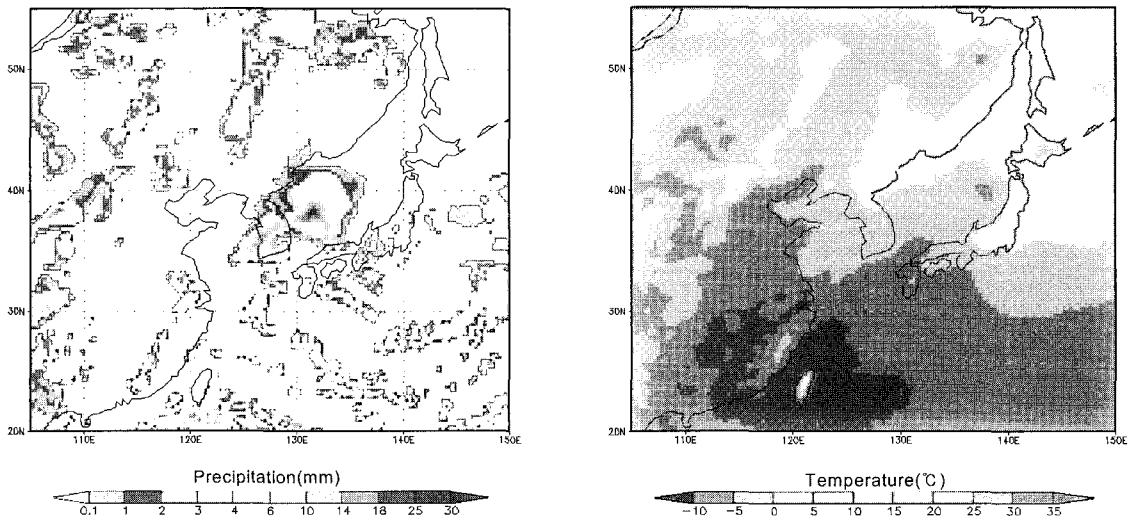


그림 1. RDAPS 예보영역



(a) 강수량(mm)　　(b) 지표기온(℃)

그림 2. RDAPS 강수량 및 지표기온 예보자료

3. 저류함수(SFM) 모델

본 연구에서는 단기 예측강우의 현업적 활용성(operational applicability)을 검토하고자 하천유출량 예측기법과의 연계방안을 모색하였다. 2장에서 설명한바와 같이 기상청에서는 단기 기상예보결과로 동아시아 전역을 통해 RDAPS(30km) 예보결과를 총 48시간 동안 3시간 간격으로 제공하고 있다. 이러한 결과를 하천유출량 예측과 연계하기 위해서는 그 예보기간을 감안할 때 치수개념의 유출량 모의 기법과 그 개념이 일치한다 할 수 있다. 한편, 한국수자원공사에서는 치수기(단기) 및 이수기(중·장기) 하천유출량 예보 모델로 저류함수(SFM) 모델 및 SSARR(Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation) 모델을 운영하고 있다. 본 연구의 목적에 비추어 단기 예측강우 활용성은 치수 모델인 SFM 모델을 기반으로 수행되었다.

SFM 모델은 Kimura(1961)에 의해 처음 소개되어 국내에서도 많은 연구가 수행되었으며, 이에 대한 기본이론(정상만 등, 1993; 배덕효, 1997; 이정규와 김한섭, 2000) 및 매개변수 추정(윤재홍 등, 1991; 이정규와 이창해, 1996; 박봉진 등, 1997)에 대한 개념들은 널리 알려진 상태다.

소유역에서 타당한 저류함수의 적용 범위는 유역면적 10~1,000km^2, 유로연장 10~100km에서 만족할 만한 정확도로 유출량을 산정할 수 있다고 알려져 있으나, 바람직한 유역 면적은 100km^{2}이내이다. 큰 유역에 대한 홍수 유출 계산에 있어서는 전체 유역을 작은 소유역과 하도로 분할하여 유역추적과 하도추적을 상류로부터 하류로 순차적으로 실시하게 된다. 유역분할에 있어서 고려할 점으로는 지형적 특성(유역계, 유로연장, 경사 등), 하도의 구성, 강우의 분포 특성, 수위·유량 관측소의 위치, 강우·유량 자료 상황 및 홍수 예보상의 주요 지점 등을 들 수 있다(Kimura, 1961).

SFM 모델의 하도추적 방법으로는 저류함수법에 의한 하도추적 방법(배덕효와 정일문, 2000)과 함께 Muskingum, Muskingum-Cunge 방법(Chow, 1988) 등을 사용하고 있으며, 주로 지역화 분석식을 사용하고 홍수파의 가변성에 대한 영향, 하도의 확산효과, 입력자료의 수, 계산결과 해석의 용이성 등을 고려하여 저류함수법이나 Muskingum 방법이 사용된다.

4. 사례연구

4.1 대상유역 및 연계기법 설계

단기 기상-수자원 연계기법의 활용성을 검토하기 위해 그 대상유역을 그림 3과 같은 2,703km^{2}의 유역면적을 갖는 소양강 댐 상류 유역으로 선정하였다. 소양강은 총 유로연장이 166.2km로써 한강수계를 형성하는

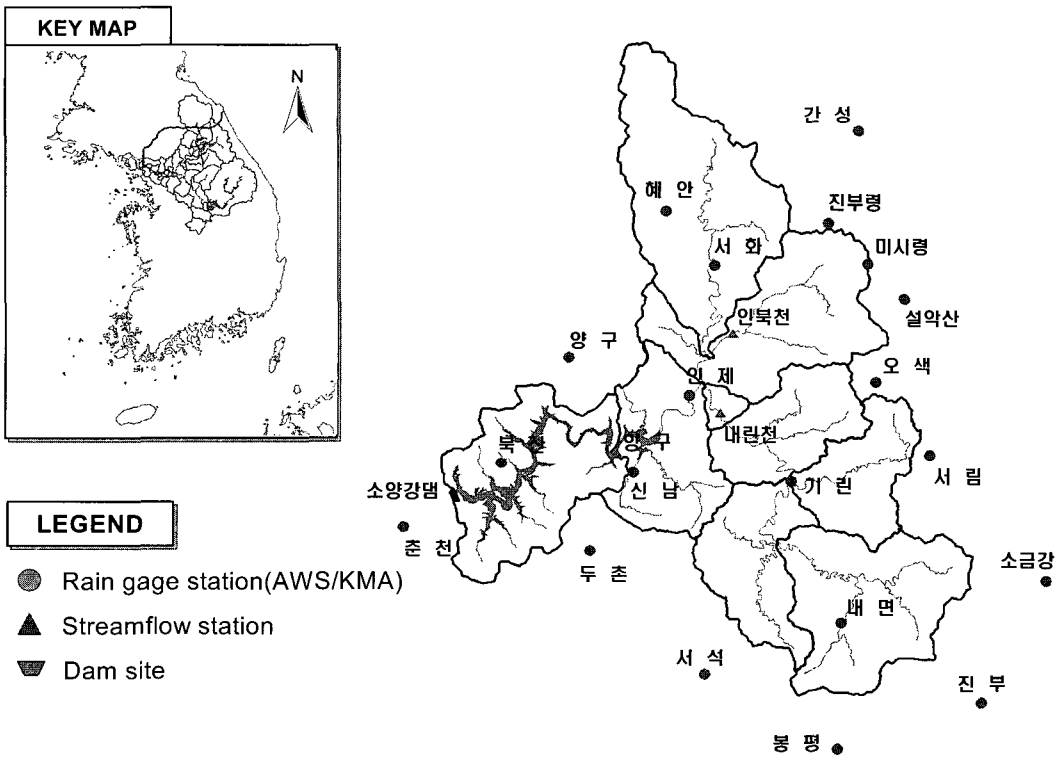


그림 3. RDAPS-SFM 사례연구를 위한 대상유역 및 유역구분

북한강의 최대 지류이며 인북천 및 내린천의 두 지류로 구성되어 있다. 소양강은 오대산(EL. 1,563m) 부근에서 발원하여 남으로 유하하다가 춘천시 남북방에서 북한강과 합류한다. 소양강댐 상류유역에는 유량관측을 위한 3개의 수위관측소(인북천, 내린천, 양구)와 소양강댐 지점이 존재하며, 강우관측을 위한 20개소의 기상청 자동기상관측소(Automatic Weather Station, AWS)가 존재한다. 본 사례연구에서는 기상청 AWS 강수 관측자료를 사용하였는데, 이는 RDAPS 모형이 초기장으로부터 예보자료를 생산함에 있어 AWS자료가 초기장 생성에 기여하기 때문이다. 그림 4는 대상유역에 걸친 RDAPS 격자점을 나타낸 것으로 본 연구에서 사용된 RDAPS의 공간해상도가 30km인 관계로 소양강 유역에 영향을 미치는 격자 수는 9개로 검토되었다.

소양강 유역 사례분석을 위해서는 SFM 모델의 입력으로 사용되는 유역 평균강우량(Mean Areal Precipitation, MAP)을 계산하여야 한다. 본 분석에서는 Thiessen의 면적 가중치법을 사용하여 소양강 단일유역에 걸친 기상청 AWS 지점 및 RDAPS 격자점에 대해서 티센계수를 산정하였다. 이렇게 계산된 RDAPS MAP는 소양강 소유역들을 대상으로 강수정보가 입력되어 유출량 예측을 수행하게 된다.

이와 같은 AWS 관측강수 및 RDAPS 예측강수량의 유역평균값은 SFM 모델의 입력값으로 사용되기 위해 그림 5와 같은 연계방법으로 설계된다. 그림에서와 같이 우선 총 계산시간은 96시간으로 중앙 48시가 현재시간(current time)으로 가정될 때, 현재 시간을 기준으로 과거 48시간(-48h) 동안에는 AWS 관측 강우량이 입력으로 들어가고 미래 48시간(+48h) 동안에는 RDAPS 예측 강우자료가 입력된다. SFM 모델은 입력된 강우량으로부터 총 96시간 동안 유출량을 계산하며 과거 48시간 동안에는 모델의 비교·검증을 위해 관측 유출량 값이 동시에 표출된다. 이러한 RDAPS-SFM 결합개념은 선행강우 사상에 대한 충분한 고려를 위해 설계되었고 RDAPS의 강수예측결과의 신뢰성을 보완하기 위함이다.

4.2 대상자료 및 RDAPS 예측강우의 정확도 평가

본 연구에서 사용된 RDAPS 예측자료의 사례기간은 2003년 7월 18일부터 2003년 7월 24일까지이며, 이 기간 동안의 관측 강우량과 관측 유입량 수문곡선을 살펴보면 그림 6과 같다. 총 강우량은 169.17mm로 관측 되었으며, 유입량 첨두치는 3,080cms로 검토되었다. 과거 관측기록을 조사한 결과 그다지 크지 않은 강우-유출사상으로 판단되며, 전반기에는 작고 후반기에는 큰 강우-유출사상이 두 번 나타나는 사례이다.

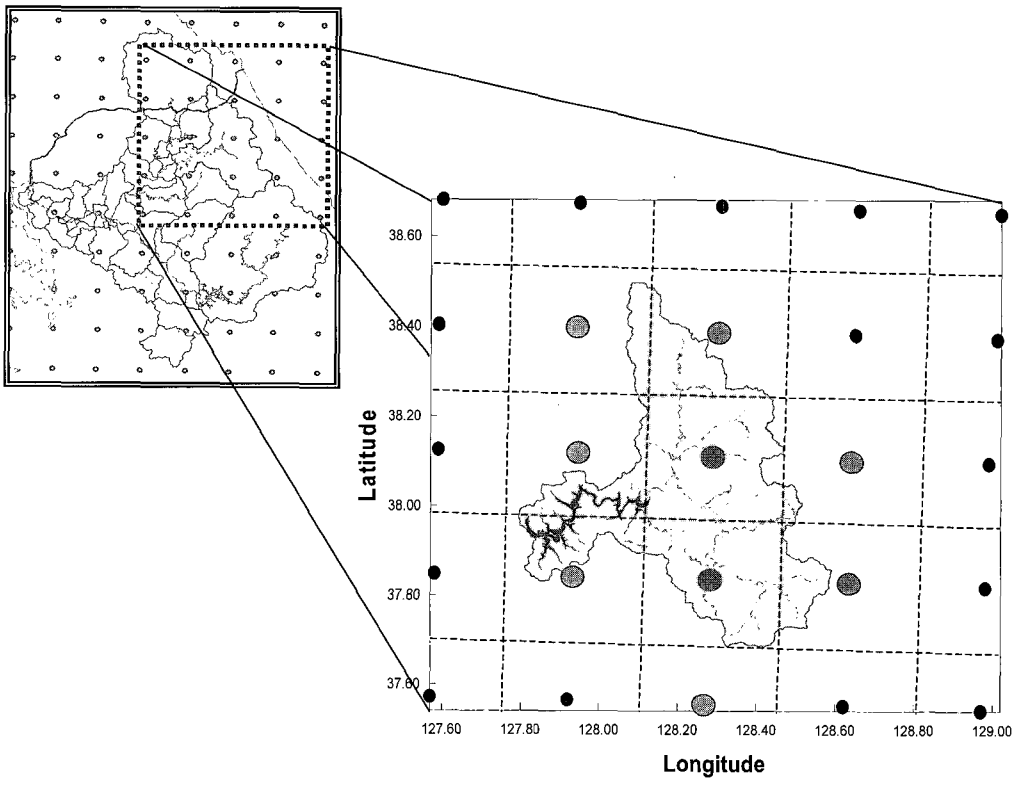


그림 4. 대상유역에 걸친 RDAPS(30km) 격자점

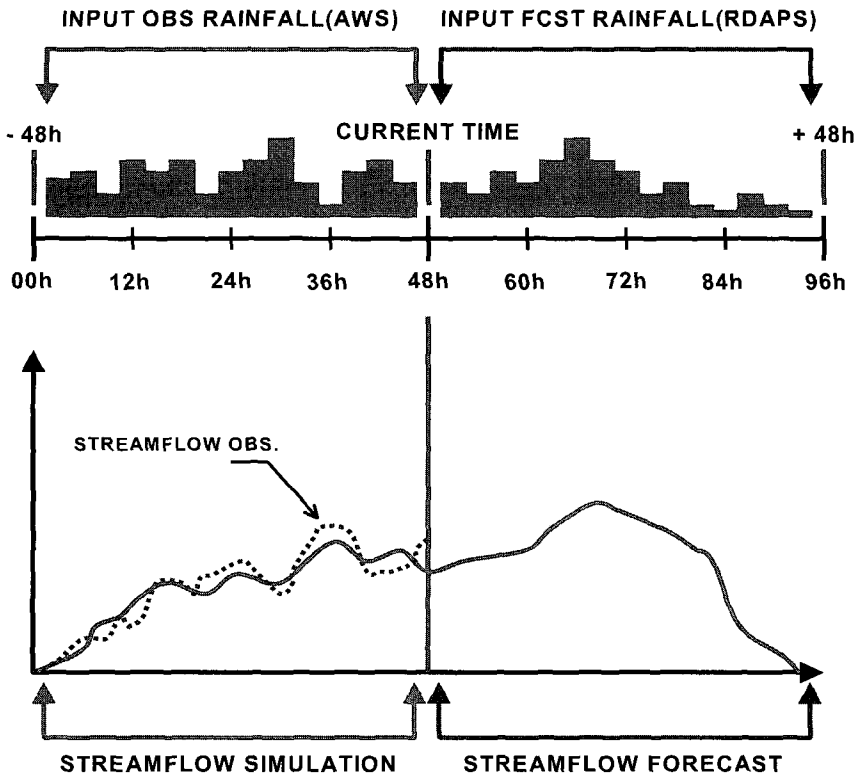


그림 5. RDAPS-SFM 연계기법 설계 모식도

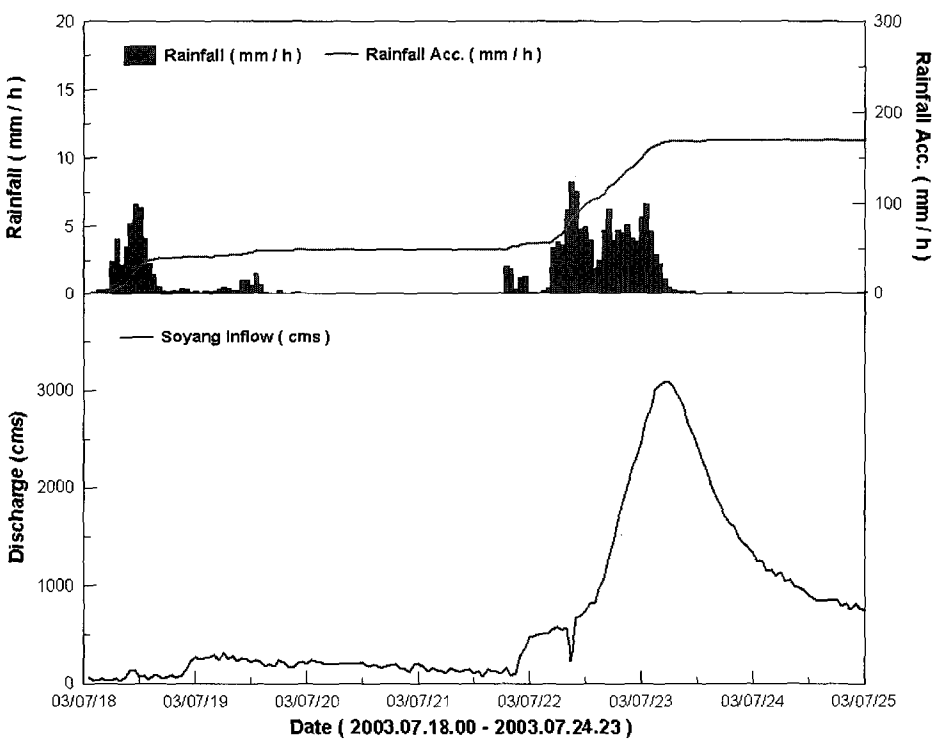
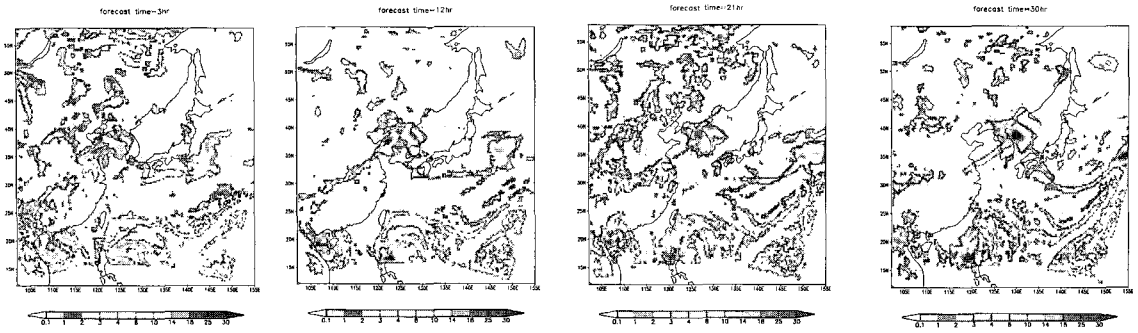
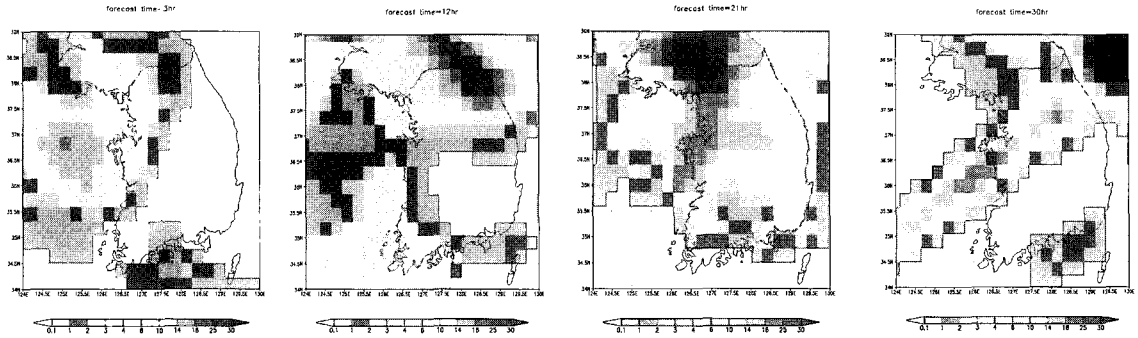


그림 6. 사례기간에 대한 강우 및 유입량 수문곡선

가장 많은 강우량을 기록한 7월 21일 17시부터 7월 23일 04시 중 7월 21일 12UTC에 계산한 RDAPS 예측 결과(2003.07.21.21~2003.07.23.20 KST)를 9시간 간격으로 나타내면 그림 7과 같다. 그림 7(a)는 동아시아 영역에서의 강우분포 사례를 나타낸 것이고 그림 7(b)는 한반도 영역에서의 강우분포 사례를 나타낸 것이다.



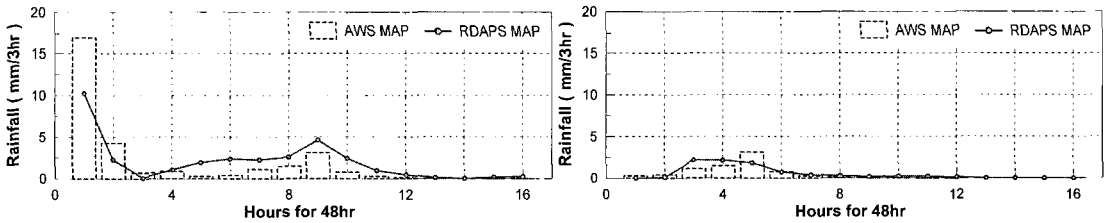
(a) RDAPS 강수 예측결과(동아시아 영역)



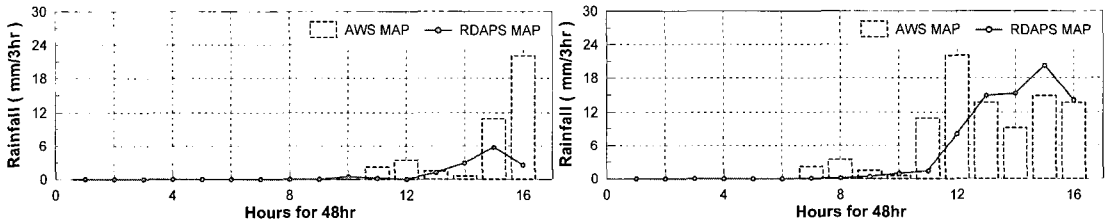
(b) RDAPS 강수 예측결과(한반도 영역)

그림 7. RDAPS 2003.07.21.12 UTC 강수 예측결과

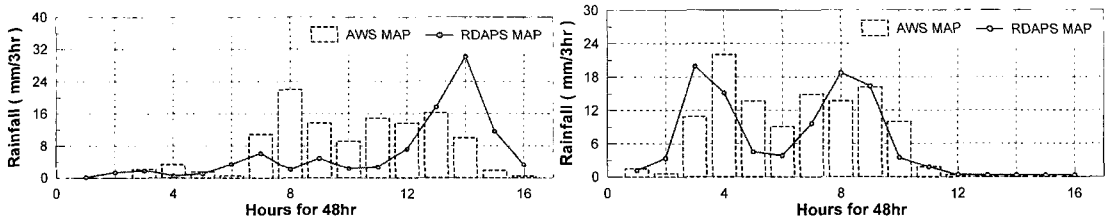
그림 7과 같은 RDAPS 예측자료의 수문학적 정확도를 평가하기 위해 RDAPS 및 AWS 관측강우의 소양강 상류 유역 평균강우량(MAP)을 계산하였다. MAP 계산 결과의 일부를 도시하면 그림 8과 같고, 여기서 실선은



(a) 2003.07.18.00 UTC 예측결과 (b) 2003.07.18.12 UTC 예측결과



(c) 2003.07.20.00 UTC 예측결과 (d) 2003.07.20.12 UTC 예측결과



(e) 2003.07.21.00 UTC 예측결과 (f) 2003.07.21.12 UTC 예측결과

그림 8. RDAPS 및 AWS 소양강 유역 MAP

RDAPS MAP, 점선 막대그래프는 AWS의 관측 MAP를 나타낸다. 한편, 2003년 7월 22일의 결과는 2003.07.22.00 UTC RDAPS 예측자료가 누락되어 그림에서 제외하였다. 그림 8에서 알 수 있는바와 같이 RDAPS 예측강우는 강수의 유무를 정확히 반영하는 측면에서 정성적으로 매우 높은 정확도를 가지고 있고 시간대별 강수량의 정량적 측면에서도 몇몇 경우를 제외하고는 대체적으로 우수한 결과를 나타낸다. 본 계산결과로부터 RDAPS 예측강우의 정확도를 평가하기 위해 RDAPS 및 AWS의 평균(mean), 표준편차(sd), 이들 사이의 상관계수(cc), 평균제곱오차(rmse) 등의 통계치를 계산하여 평가하였다.

표 1의 통계특성치 계산결과에서와 같이 RDAPS 및 AWS MAP 사이의 상관계수는 2003.07.19.00, 2003.07.21.00 UTC의 계산결과를 제외하고 0.60~0.99의 범위를 보이며, 이에 대응하는 평균제곱오차는 0.0619~5.1627mm의 범위를 보이고 있다. 이러한 결과는 그림 8에서와 같이 정성적 측면의 결과와 유사한 경향을 보이고 있고, 정량적 측면에서도 강수총량이 1mm 이상인 시간대를 기준으로 그 평균제곱오차가 강수총량에 비하여 4.0~12.8% 범위를 보이고 있어 수자원 측면에서 필요한 정량적 성격을 어느 정도 충족시키는 것으로 판단된다.

4.3 기존 하천유출량 예측기법을 활용한 RDAPS-SFM 사례분석

현재 한국수자원공사에서는 인공위성 구름사진, 기상청의 일기도와 수치예보도, 일본 및 미국 기상청의 수치강우예보 자료, 레이더 영상, 실시간 관측자료 등을 이용하여 종관적인 방법으로 다목적댐 유역의 강우예보를 실시하고 있다. 단기 정량적 강우예보는 24~48시간 이내의 예측강우량을 앞선 자료 등을 통해 산출하고 이를 수문분석모형에 입력자료로 활용해 유출량을 분석하고 이를 토대로 저수지 운영계획을 수립하고 있다(기상청, 2002). 여기서 예측강우에 대한 입력자료를 생성하는 방법은 예측강우량의 총량과 지속시간을 산출하여 그림 9와 같은 증가형(Increment), 감소형(Decrement), 중앙분포형(In/Decrement), 균등형(Rectangular), 감소-증가형(De/Increment), 후반부 집중형(Uniformly Increment), 전반부 집중형(Uniformly Decrement) 등의 예측강우 분포형태를 선택함으로써 입력자료를 생성한다.

표 1. RDAPS 예측강우 및 AWS 관측강우에 대한 통계특성치

예측 기준시간 (UTC)	예측/관측	평균 (mean)	표준편차 (sd)	상관계수 (cc)	평균제곱오차 (rmse)
2003.07.18.00	RDAPS	1.9855	2.4763	0.9250	2.0240
	AWS	1.9007	4.0807		
2003.07.18.12	RDAPS	0.5153	0.7561	0.8226	0.4691
	AWS	0.4702	0.8041		
2003.07.19.00	RDAPS	0.7106	0.7544	0.2295	1.0305
	AWS	0.2666	0.7544		
2003.07.19.12	RDAPS	0.6524	0.9420	0.8784	0.5558
	AWS	0.3493	0.9472		
2003.07.20.00	RDAPS	0.8098	1.5548	0.6271	5.1627
	AWS	2.5275	5.6905		
2003.07.20.12	RDAPS	4.7120	6.9507	0.7707	4.8136
	AWS	5.7306	6.9420		
2003.07.21.00	RDAPS	6.0338	7.6353	0.2743	8.8929
	AWS	7.5025	6.8919		
2003.07.21.12	RDAPS	6.2250	6.9848	0.7954	4.6269
	AWS	7.1726	7.1640		
2003.07.22.12	RDAPS	0.4587	1.0838	0.9925	3.6038
	AWS	1.7903	4.4217		
2003.07.23.00	RDAPS	0.0635	0.1602	0.6054	0.1286
	AWS	0.0590	0.1130		
2003.07.23.12	RDAPS	0.0505	0.1120	0.8466	0.0619
	AWS	0.0439	0.1102		
2003.07.24.00	RDAPS	0.3362	0.7729	0.9251	0.7330
	AWS	0.0439	0.1102		
2003.07.24.12	RDAPS	0.1087	0.2586	0.8723	0.1822
	AWS	0.0479	0.1093		

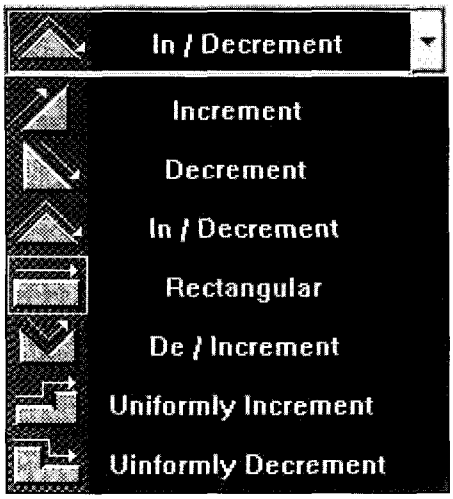


그림 9. 강우예측에 활용되는 7가지 강우분포형

한편, 특정 유역에서 SFM 모델을 사용하여 유출량을 계산하기 위해서는 모형에 포함된 유역 및 하도의 매개변수(저류함수의 시간상수 K, 저류함수의 지수승 p, 유역의 지체시간 T_l, 일차 유출률 f_l, 포화우량 R_{sa}, 하도의 시간상수 K', 하도의 지수승 p', 하도의 지체시간 T_l')를 과거의 강우 및 수위자료로부터 추정하여야 한다. 매개변수 추정방법으로는 해석적 방법, 최적화 및 경험적 방법 등이 존재하지만, 본 연구는 하천유출량 예측의 현업적 측면에서 예측강우의 활용성을 검토하고자 하기 때문에 상세한 매개변수의 검·보정 방법보다는 현재 실무에서 사용 중인 매개변수를 기본으로 대상 강우-유출 사상에 적합한 최적의 매개변수를 수동보정법으로 추정하여 사용하였다. 표 2는 추정된 매개변수를 나타낸 것으로, 실무에서 사용 중인 SFM 모델은 소양강 유역을 9개의 소유역과 6개의 하도로 나누어(한국수자원공사, 2003) 소양강댐 유입량 계산을 수행한다.

이와 같은 SFM 모델의 현업적 활용방법을 바탕으로 RDAPS-SFM 연계기법 적용을 수행하고자 예측강우가 계산 시작시간부터 비교적 잘 분포된 2003.07.21.12 UTC 적용사례를 선택하여 상술한 모든 분포형을 적용해 보았다. 이때 사용된 예측 총강우량은 99.66mm이고 지속시간은 36시간으로 입력하였다. 이들의 소양강댐 유입량 예측결과 중 일부를 나타내면 그림 10과 같고, 통계특성치는 표 3과 같다.

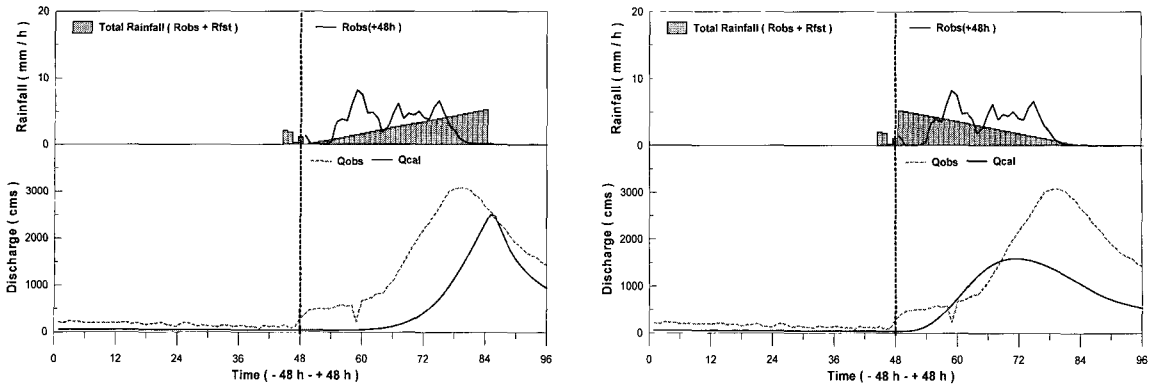
그림 10과 표 3에서 알 수 있는바와 같이 분포형에 따른 예측결과는 중앙분포형일 경우 상관계수가 0.98, 평균제곱오차가 581.19cms, 유출용적 상대오차가 -48.6%로 가장 정확하게 예측한 것으로 검토되었다. 이 기간 중 강우 지속시간은 비교적 정확하게 예측되었지만, 예측강우가 관측강우(114.79mm)에 비해 -15.2% 과소 모의하였기 때문에 예측수문곡선이 모든 분포형에서 과소 모의되는 것으로 나타났다.

표 2. SFM 모델의 유출계산에 사용된 매개변수

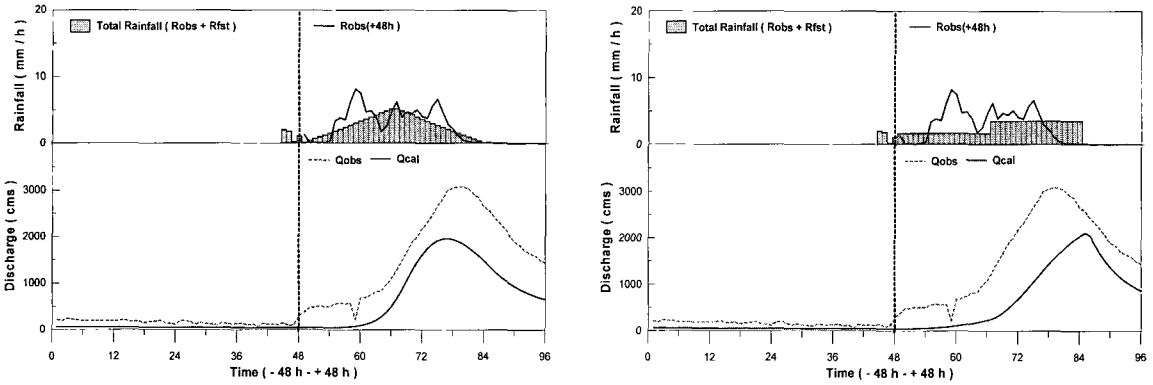
유역 번호	K	p	T_l	f_l	R_{sa}	하도 번호	K'	p'	T_l'
1	48.55	0.50	2.41	0.50	14.00	1	12.97	0.60	0.05
2	49.14	0.29	1.25	0.50	14.00	2	18.10	0.60	0.05
3	54.92	0.27	1.66	0.50	14.00	3	24.30	0.60	0.08
4	56.03	0.26	1.21	0.50	14.00	4	6.64	0.60	0.02
5	54.57	0.27	1.74	0.50	14.00	5	36.35	0.60	0.12
6	54.36	0.27	0.95	0.50	14.00	6	57.07	0.60	0.21
7	58.27	0.25	0.39	0.50	14.00				
8	52.81	0.28	1.13	0.50	14.00				
9	42.97	0.32	1.62	0.50	14.00				

표 3. 예측강우 분포형에 따른 예측 유입량 통계특성치

분포형	cc	rmse (cms)	revd (%)	분포형	cc	rmse (cms)	revd (%)
증가형	0.83	746.56	-53.9	감소-증가형	0.86	754.06	-52.5
감소형	0.86	711.47	-45.9	후반부 집중형	0.92	671.86	-52.5
중앙분포형	0.98	581.19	-48.6	전반부 집중형	0.95	669.58	-48.8
균등형	0.98	641.04	-50.9	-	-	-	-



(a) 증가형 분포 예측결과 (b) 감소형 분포 예측결과



(c) 중앙분포형 분포 예측결과 (d) 후반부 집중형 분포 예측결과

그림 10. 예측강우 분포형에 따른 유입량 예측결과

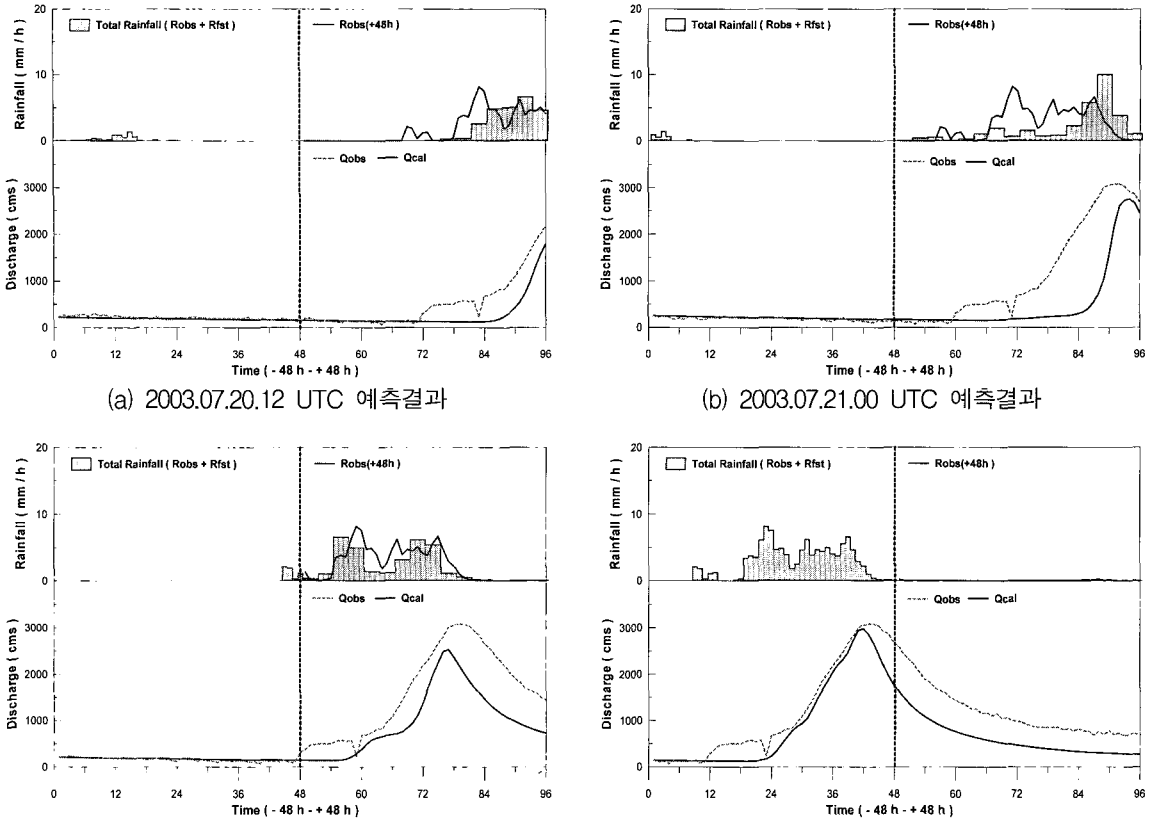
기존의 하천유출량 예측에 사용된 예측강우의 총량과 지속시간만을 이용한 기법은 미래에 발생할 강우분포를 모르는 상태에서 이를 여러 분포형으로 가정하여 시도된 매우 유용한 기법 중 하나도 간주될 수 있으나, 본 연구에 결과에서처럼 다소의 불확실성을 가지며 정확한 유출계산에서 미흡한 측면을 내포하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 4.1절에서 기술한 연계기법을 바탕으로 그림 8과 같이 정성적으로 강우발행유·무의 예측정확도가 높은 RDAPS 예측강우의 분포까지 활용하여 SFM 모델의 하천유출량 예측에 적용하여 그 결과를 분석하였다.

4.4 제안된 RDAPS-SFM 연계기법 사례분석

본 절에서는 상술한 바와 같이 RDAPS의 강우예측결과로부터 SFM 모델의 유출량 예측결과를 분석하였다. RDAPS의 계산결과가 매일 00, 12UTC에 두 번(12시간 간격) 산출되므로 SFM 모델의 계산 또한 하루 두 번 96시간 동안 실행된다. 이와 같은 방법으로 계산한다면 모델 총 실행횟수는 14번이다. 매번 계산 시작시간에는 초기 유출량 값이 SFM 모델에 입력되어 선행토양조건을 고려해 주도록 하였고, RDAPS 예측강수결과가 3시간 누적강수량으로 산출되므로 이를 각 시간마다 등분하여 1시간 자료로 입력하였다.

이상과 같은 관측자료 및 RDAPS 예측자료를 활용하여 소양강댐 상류유역에 대한 RDAPS-SFM 유출량 예측결과 중 일부를 나타내면 그림 11과 같다. 그림에서 상단의 막대그래프는 강우량 입력값으로 중앙 분리선에서 과거 48시간 동안은 AWS 관측 강우량 값이고, 미래 48시간 동안은 RDAPS 강우예측의 유역평균값이다. 또한, 실선으로 나타낸 Robs(+48h)는 RDAPS 예측 기간에 관측된 AWS 강우량을 예측결과와 비교하기 위해 나타내었다. 또한, 그래프 하단의 Qobs 및 Qcal은 각각 관측 및 계산 수문곡선을 의미한다. 그림 11의 결과를 살펴볼 때 대체적으로 RDAPS 예측결과가 소양강댐 유입량 예측계산의 정확도에 매우 민감하다는 것을 알 수 있다. 이들의 예측 정확도를 평가하기 위해 다수의 통계특성치를 계산하였고, 이들의 결과는 표 4와 같다.

표 4의 통계특성치는 상관계수(cc), 평균제곱오차(rmse), 유량 관측치와 계산치에 대한 유출용적 상대오차(revd) 등이다. 상관계수의 경우 2003.07.20.00 UTC 예측결과를 제외한다면 0.58~0.97의 범위를 보이고, 평균제곱오차는 82.54~678.17cms, 유출용적 상대오차는



(a) 2003.07.20.12 UTC 예측결과 (b) 2003.07.21.00 UTC 예측결과

(c) 2003.07.21.12 UTC 예측결과 (d) 2003.07.23.00 UTC 예측결과

그림 11. RDAPS-SFM 강우 및 유입량 예측결과

표 4. RDAPS-SFM 소양강댐 유입량 예측에 대한 통계특성치

DATE(UTC)	cc	rmse (cms)	revd (%)	DATE(UTC)	cc	rmse (cms)	revd (%)
2000.07.18.00	0.83	82.54	23.9	2000.07.21.12	0.96	518.22	-35.1
2000.07.18.12	0.78	84.67	23.6	2000.07.22.00	-	-	-
2000.07.19.00	0.71	88.13	31.7	2000.07.22.12	0.88	674.60	-43.0
2000.07.19.12	0.58	93.78	36.5	2000.07.23.00	0.95	480.90	-34.1
2000.07.20.00	0.11	138.77	-23.9	2000.07.23.12	0.97	377.08	-26.1
2000.07.20.12	0.87	257.49	-36.4	2000.07.24.00	0.97	502.52	-28.0
2000.07.21.00	0.77	664.75	-44.5	2000.07.24.12	0.90	678.17	42.7

-44.5~42.7%의 범위를 보였다. 이들 결과에 따르면, 정량적으로 RDAPS 예측강우의 정확도에 따른 다소의 불확실성을 내포하고 있지만 그 정확도가 기존 하천유출량 예측기법 보다 비교적 높은 것으로 나타났다. 특히, 기존 하천유출량 사례분석에 사용된 2003.07.21.12UTC 예측결과의 경우 제안된 RDAPS-SFM 연계기법의 상관계수는 0.96으로 표 3의 분포형(기존 하천유출량 예측기법)에 따른 상관계수 0.83~0.98과 유사한 경향을 보이지만, 평균제곱오차 및 유출용적 상대오차는 각각 518.22cms, -35.1%로 나타나 분포형 결과와의 정량적 평가에서는 약 -30~-10% 범위로 그 오차가 감소된 것으로 검토되었다.

본 사례기간 동안만의 결과로 기상-수자원 연계 모의·예측의 모든 신뢰도를 평가할 수 없지만 본 RDAPS-SFM 강우 및 유입량 예측결과는 상당한 정확도를 가지며 수행될 수 있다는 것을 살펴 볼 수 있었다. 특히 강수가 나타나는 7월 20, 21일의 경우 RDAPS의 강우 예측결과가 정성적 및 정량적으로 비교적 정확하게 모의되어 SFM 모델의 유입량 계산에 매우 큰 참고자료가 될 수 있음을 입증하였고, 무강수 기간에 대한 정확한 예측을 통해 수문곡선의 하강부를 매우 정확하게 예측함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 단기 기상 수치모델의 예측강우량을 활용하여 실시간 하천유출량을 계산할 수 있는 기법을 제안하였다. 이를 위해 기상청의 RDAPS 강수자료와 SFM 모델을 활용하여 소양강댐 상류유역의 댐유입량을 계산하고 그 정확도를 분석하였다. 또한, 수자원 전문가 입장에서 기상 수치자료의 특성을 분석하고 수자원 분야에 이용될 수 있도록 자료의 정확도 분석 및 활용성을 제공하고자 하였다.

대상 사례기간인 2003년 7월 18일부터 2003년 7월 24일까지 RDAPS 강우예측자료의 정확도를 평가한 결과 RDAPS 및 AWS MAP 사이의 상관계수는 0.60~0.99의 범위를 보이며, 이에 대응하는 평균제곱오차는 0.0619~5.1627mm의 범위로 나타났다. 이러한 결과는 정성적 측면에서 매우 우수한 정확도를 보이고, 수자원 측면에서 필요한 정량적 성격도 어느 정도 충족시키는 것으로 사료된다.

이러한 RDAPS 강우예측 자료를 활용하여 소양강댐 상류유역을 대상으로 SFM 모델의 하천유출량 예측모의에 적용하였다. 강우 총량과 지속시간을 이용하여 7가지 분포형으로 분석한 기존 하천유출량 예측기법의 RDAPS-SFM 사례분석은 중앙분포형일 경우 가장 정확하게 예측한 것으로 검토되었다. 이러한 결과는 미래에 발생할 강우분포를 예측강우의 총량과 지속기간으로 가정하여 하천유출량을 예측하는 매우 유용한 방법이 될 수 있으나, 정성적으로 그 예측결과가 우수한 RDAPS 강수정보를 활용한다면 보다 객관적이고 정확한 평가가 가능하리라 판단되었다.

따라서, 기존의 하천유출량 예측기법을 보완하고자 제안된 RDAPS-SFM 모델의 하천유출량 계산에서는 RDAPS 예측강수의 정확도에 따른 정량적 불확실성이 다소 존재하지만, 그 정확도가 기존의 하천유출량 예측방법보다 비교적 높은 것으로 나타났다. 본 사례기간 동안만의 결과로 기상-수자원 연계 모의·예측의 모든 신뢰도를 평가할 수 없지만 본 RDAPS-SFM 강우 및 유입량 예측결과는 상당한 정확도를 가지며 수행될 수 있다는 것을 살펴 볼 수 있었다.

전체적으로 현재의 하천 유출량 예측에서 기상 수치예보자료의 활용성은 높은 것으로 사료된다. 향후 보다 많은 사례연구를 통하여 기상 수치예보자료를 활용한 유출량 예측의 정확도가 평가되어야 할 것이며, 이는 현업에서의 기상-수자원 연계 활용의 신뢰성을 향상시키는 계기가 될 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발사업의 세부과제 한반도 악기상(집중호우) 감시 및 예측기술개발로 수행된 것이며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

건설교통부 (2003). **수계별 계절예측강우의 댐운영 적용방안 연구**, 한국수자원공사. pp. 441.

기상청 (2002). 제 4 회 수치예보자료 이용자 워크숍.

박봉진, 차형선, 김주환 (1997). "유전자 알고리듬을 이용한 저류함수모형의 매개변수 추정에 관한 연구." **한국수자원학회논문집**, 제30권, 제4호, pp. 347-355.

배덕효 (1997). "저류함수법을 이용한 추계학적 실시간 홍수예측모형 개발." **한국수자원학회논문집**, 제30권, 제5호, pp. 449-457.

배덕효, 정일문 (2000). "저류함수법에 의한 추계동역학적 하도홍수추적모형의 개발." **한국수자원학회논문집**, 제33권, 제3호, pp. 341-350.

윤재홍, 고석구, 김양일 (1991). "최적화 기법에 의한 저류함수 유출 모델의 자동 보정." **수공학논총**, 제33권, pp. 88-101.

이정규, 김한섭 (2000). "홍수예보를 위한 통합저류함수 모형의 퍼지제어 (I): 이론 및 모형의 수립." **한국수자원학회논문집**, 제33권, 제6호, pp. 689-699.

이정규, 이창해. (1996). "저류함수법의 시변성 매개변수 조정에 퍼지이론 도입에 관한 연구." **한국수자원학회논문집**, 제29권, 제4호, pp. 149-159.

장기호, 김진훈, 배덕효, 권원태 (2002). "1998 호우사상에 대한 대기-유량 결합 모델 모의실험: IHP 평창강 유역." **한국기상학회논문집,** 제38권, 제5호, pp. 509-522.

정상만, 김현수, 안계헌, 노순안, 이성재 (1993). "저류함수법에 의한 한강유역 주요지점의 홍수위 예측." **수공학연구발표회논문집**, pp. 369-375.

한국수자원공사 (2003). **KOWACO 홍수분석모형 개발 보고서**, 물관리센터.

Anthes, R.A. and Warner, T.T. (1978). "Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies." *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 106, pp. 1045-1078.

Anthes, R.A., Hsie, E.-Y. and Kuo, Y.H. (1987). *Description of the Penn State/NCAR Mesoscale Model Version 4 (MM4).* NCAR/TN-282+STR,

National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, pp. 66

Arakawa, A. and Lamb, V.R. (1997). *Computational design of the basic dynamical process of the UCLA general circulation model, Methods in Computational Physics*. Academic Press, pp. 173-265.

Bae, D.-H. and Kim, J.-H. (2000). "A Coupled Precipitation-Streamflow Model for Flow Forecasting in Large Drainage Basins." *The 4th International Conference HydroInformatics*, Iowa University, Iowa, USA, 23-27, July, 2000.

Benoit, R., Pellerin, P., Kouwen, N., Ritchie, H., Donaldson, N., Joe, P. and Soulis, E. D. (2000). "Toward the use of coupled atmospheric and hydrologic models at regional scale." *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 128, pp. 1681-1706.

Chang, K.-H., Kim, J.-H., Cho, C.-H., Bae, D.-H. and Kim J. (2004). "Performance of a Coupled Atmosphere-Streamflow Prediction System at the Pyungchang River IHP Basin." *J. of Hydrology*, Vol. 288, pp. 210-224.

Chow, V.T., Maidment D.R. and Mays L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGRAW-HILL press.

Dudhia, J. (1989). "Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model." *J. Atmos. Sci.*, Vol. 46, pp. 3077-3107.

Grell, G.A., Dudhia J. and Stauffer, D.R. (1995). *A description of the fifth-generation Penn State/ NCAR mesoscale model (MM5)*. NCAR Tech. Note NCAR/TN-398ISTR, pp. 122

Hong, S.-Y., and Pan, H.-L. (1996). "Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model." *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 124, pp. 2322-2339.

Kain, J.S., and Fritsch, J.M. (1990). "A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization." *J. Atmos. Sci.*, Vol. 47, pp. 2784-2802.

Kim J. (2001). "A nested modeling study of elevation-dependedt climate change signals in California induced by increased atmospheric CO." *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 28, pp. 2951-2954.

Kim, J., Miller, N.L., Farrara, J. and Hong, S. (2000). "A seasonal precipitation study in the Western United States during the 1997/1998 winter season using a dynamic downscaling system." *J. Hydrometeor.*, Vol. 1, pp. 311-329.

Kimura, T. (1975). Run-off calculation method. Ministry of Construction and International Cooperation Agency.

Klemp, J.B., and Durran, D.R. (1983). "An upper boundary condition permitting internal gravity wave radiation in numerical mesoscale models." *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 111, pp. 430-444.

Kwon, H.J., Won, S.H., Ahn M.-H.. Suh, A.-S. and Chung, H.-S. (2002). "GFDL-Type Typhoon Initialization in MM5." *Mon. Wea. Rev.*, Vol 130, pp. 2966-2974.

Leavesley, G.H., Branson, M.D. and Hay, L.E. (1992). "Using coupled atmospheric and hydrologic models to investigate the effects of climate change in mountainous regions." *WRA 28th Ann. Conf. and Symp., Managing water resources during global change*. Reno, Nevada, USA, November 5, 1992, pp. 691-700.

Pereira Fo. A.J., Crawford K.C. and Stensrud D.J. (1999). "Mesoscale precipitation fields. Part II: Hydrometeorologic Modeling." *J. Appl. Meteor.*, Vol. 38, pp. 102-125.

(논문번호:04-75/접수:2004.07.30/심사완료:2004.12.21)