

## 중장기 유량예측 향상을 위한 국내 기후정보의 이용

### Use of Climate Information for Improving Extended Streamflow Prediction in Korea

이재경\* / 김영오\*\* / 정대일\*\*\*

Lee, Jae-Kyoung / Kim, Young-Oh / Jeong, Dae-Il

#### Abstract

Since the accuracy of climate forecast information has improved from better understanding of the climatic system, particularly, from the better understanding of ENSO and the improvement in meteorological models, the forecasted climate information is becoming the important clue for streamflow prediction. This study investigated the available climate forecast information to improve the extended streamflow prediction in Korea, such as MIMI(Monthly Industrial Meteorological Information) and GDAPS(Global Data Assimilation and Prediction) and measured their accuracies. Both MIMI and the 10-day forecast of GDAPS were superior to a naive forecasts and performed better for the flood season than for the dry season, thus it was proved that such climate forecasts would be valuable for the flood season. This study then forecasted the monthly inflows to Chungju Dam by using MIMI and GDAPS. For MIMI, we compared three cases: All, Intersection, Union. The accuracies of all three cases are better than the naive forecast and especially, Extended Streamflow Predictions(ESPs) with the Intersection and with Union scenarios were superior to that with the All scenarios for the flood season. For GDAPS, the 10-day ahead streamflow prediction also has the better accuracy for the flood season than for the dry season. Therefore, this study proved that using the climate information such as MIMI and GDAPS to reduce the meteorologic uncertainty can improve the accuracy of the extended streamflow prediction for the flood season.

**keywords** : climate information, monthly industrial meteorology information, GDAPS, ensemble streamflow prediction, forecasting accuracy

#### 요 지

중장기 기후예보는 기후역학모형의 비약적인 발전과 ENSO 등의 기후현상에 대한 규명으로, 전세계적으로 정확성이 크게 향상되고 있어 중장기 유량예측의 중요한 실마리가 되고 있다. 본 연구에서는 우선 중장기 유량예측 향상을 위하여 국내에서 사용가능한 기후정보, 즉 월간산업기상정보와 GDAPS(Global Data Assimilation and Prediction System)를 조사하고 그 정확성을 평가하였다. 월간산업기상정보와 GDAPS의 순별 예보에서 모두 초보예측보다 정

\* 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정  
Ph.D. Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul, Korea  
(e-mail: myroom1@snu.ac.kr)

\*\* 교신저자, 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수  
Associate Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul, Korea  
(e-mail: yokim05@snu.ac.kr)

\*\*\* 서울대학교 공학연구소 선임연구원  
Researcher, Engineering Research Institute, Seoul National Univ., Seoul, Korea  
(e-mail: jung922@snu.ac.kr)

확하였고 특히 갈수기보다는 홍수기에 정확성이 더 높게 나와 이 기간에는 기후예보로서 유효함을 확인하였다. 다음으로 기후예보를 이용하여 충주댐 유역에 대하여 유량예측을 수행하였다. 월간산업기상정보에서는 전체 시나리오, 교집합 시나리오, 합집합 시나리오로 나누어 유량예측에 적용하였다. 세 경우 모두 초보예측보다 평균예측점수가 높아 예측으로서 유효하였으며, 특히 홍수기에 교집합 및 합집합 시나리오의 평균예측점수가 전체 시나리오보다 높게 나타났다. GDAPS를 이용한 순별 유량예측의 경우에도 역시 갈수기보다 홍수기에 더 높은 정확성이 나타났다. 따라서 본 연구에서는 홍수기에 보다 정확한 기후예보를 사용하여 기상학적 불확실성을 줄인다면 월 유량예측의 정확성을 향상시킬 수 있음을 증명하였다.

**핵심용어** : 기후정보, 월간산업기상정보, GDAPS, 앙상블 유량예측, 예측의 정확성

## 1. 서론

최근 기후분야에서는 지구(全球)모형인 GCMs (Global Circulation Models)의 꾸준한 발전과 ENSO(El Nino Southern Oscillation)를 비롯한 기후현상의 인과관계가 점차 밝혀짐에 따라 중장기 기후예보의 정확성이 크게 향상되고 있다. 기후예보의 정확성 향상은 곧바로 유량예측의 정확성 개선으로 이어질 수 있으므로 수문학자들은 기후예보에 항상 주목하고 활용하려는 노력을 계속해왔다. 미국의 NWS(National Weather Services)나 일본의 JMA(Japan Meteorologic Agency) 등에서는 이미 기후예보를 활용한 하천 유출량 예측시스템을 구축하여 운영 중이며, 활용성 및 정확성 개선에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다(한국수자원공사, 2004). 그러나 우리나라는 유량의 월별 자기상관성이 갈수기 몇 개월을 제외하고 대체로 낮을 뿐만 아니라, 유량과 교차상관성이 높은 기후인자도 이렇다하게 아직까지 밝혀진 바가 없어, 중장기 유량예측은 불확실성이 상당히 큰 실정이다. 따라서 국내 중장기 기후예보의 정확성을 진단하고 이를 유량예측에 이용하는 방안을 강구하는 연구가 필요한 시점이다.

국내외에서 수행된 기후예보를 활용한 유량예측의 최근 연구들을 정리하면 다음과 같다. Croley(1996)는 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)의 기후확률예보를 이용하여 앙상블 유량예측의 정확성을 개선시킬 수 있는 방법을 제시하였으며, Lake Superior 유역에 적용하여 그 효용성을 검증하였다. Shaake and Larson(1998)은 NWS에서 앞으로 진행할 연구과제로서 대기-수문모형의 연계운영을 통한 앙상블 유량예측의 개선을 제시하였으며, Sharma (2000)는 장기강우와 ENSO와의 연관성을 비모수(nonparametric)방법으로 강수확률예보에 적용하였고, Piechota et al.(1998, 2001)는 ENSO 지표인 SST(Sea Surface Temperature)를 이용하여 계절유량 확률예측

모형을 개발하였다. Croley(2001, 2003)는 확률론적 기후예보를 이용하여 미래에 재현 가능한 기후현상에 더 큰 확률을 부여하는 방안을 제시하였으며, Stedinger and Kim(2000)는 Croley 방법에서는 사용하지 않는 기후 입력자료의 분포를 이용하여 가중값을 구하는 PDF-Ratio 방법을 제안하였다. 기후예보가 비교적 정확한 단기예측(예, Verbunt et al., 2004; Ntelekos et al, 2004)과 ENSO나 용설의 영향이 지배적인 유역에서의 중장기 예측(예, Fortin et al, 2004; Lou et al, 2004)에서는 예측 강수앙상블을 이용한 앙상블 유량예측의 정확성이 상당히 높은 것으로 확인되었다. Bradley and Schwartz(2004)는 다양한 예보 정확도를 가지는 강수 예보자료를 생성한 후 이를 이용하여 유량예측 시나리오에 가중값을 부여하고 앙상블 유량예측의 정확성이 증가함을 증명함으로써 향후 기후확률예보를 앙상블 유량예측에 이용할 수 있음을 제시하였다.

국내 연구로 강인식과 허창희(1992)는 태평양의 해수면 온도를 이용하여 단순한 상관관계의 분석에 머물지 않고 우리나라의 여름철 강우의 예측모형을 구축하였다. 신현석과 정상민(2000)은 엘니뇨/라니냐 현상에 대한 자료를 구축하여 수문기상에 미치는 영향을 통계적으로 분석하였으며, Kim et al(2001)은 건설교통부와 한국건설기술연구원이 매월 초 발간하는 '물공급전망'의 개선을 위해 공주지점에 앙상블 유량예측기법을 적용하였다. 정대일과 김영오(2002a; 2002b)는 가상의 기후정보를 이용한 가중값을 충주댐 유입량 시나리오에 적용하여 앙상블 유량예측을 실시하였다. 정창삼 등(2004)은 중장기 기후예측에 널리 사용되는 GCM 모의결과를 이용하여 확률론적 불확실성 해석기법을 적용하고 유역단위로 관리되는 국내 수자원 운영에 대한 활용가능성을 제시하였다.

본 연구에서는 가상의 기후예보를 이용하여 유량예측의 개선 가능성을 보이거나 단순한 기후예보의 정확성을 검증하던 국내 기존연구에서 한 걸음 더 나아가,

국내 중장기 유량예측을 향상시킬 수 있는 기후예보를 광범위하게 조사하고 이들의 정확성을 진단하였으며, 이를 충주댐 유입량예측에 적용하여 그 유용성을 검증함으로써 우리나라에 적합한 기후예보의 이용방안을 제시하였다. 본 연구에서 기후예보란 10일이나 1개월 동안의 평균적인 기상상태에 대한 예보를 의미함을 미리 밝힌다.

## 2. 국내 중장기 기후예측

### 2.1 기후예보의 현황

현재 국내의 대표적 기후예보로는 기상청의 단기예보인 RDAPS(Regional Data Assimilation and Prediction System)와 중기예보인 GDAPS(Global Data Assimilation and Prediction System) 그리고 장기예보인 월간산업기상정보(MIMI, Monthly Industrial Meteorology Information) 등이 있으며, 일부 민간 기상업체에서도 중장기 기후예보를 생산하고 있다. 국외에서는 미국의 NWS, 유럽의 ECMWF(European Centre for Mid-range Weather Forecast) 등의 중장기 기후예보가 우리나라를 포함한 전지구를 대상으로 하고 있다.

#### 2.1.1 월간산업기상정보

월간산업기상정보는 전국을 대상으로 한달을 상·중·하순으로 나누어 예보를 실시하며, 예보형식을 크게 두 가지로 나누고 있다. 하나는 예보하는 월에 대한 기후특징 및 기후변화를 서술하여 나타낸 '서술형식'이며, 다른 하나는 예보하는 월의 강수와 기온을 평년과 비교하는 '비교형식'이다. 서술형식의 예보는 '많이 추워짐', '눈이 오겠음' 등 정성적으로 표현되기 때문에 사용자가 이해하기 쉽지만 '많이 추워짐'이라고 예보를 하면 어느 정도 추워지는가에 대한 정량적 기준이 없으므로 그 해석이 애매해 질 수 있는 단점이 있다. 반면 비교형식의 예보는 Table 1과 같은 정량적 기준을 정하여 '평년보다 높겠음' 등으로 표현되며, 여기서 평년이란 과거 30년 동안의 평균을 의미한다. 우리나라 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr>)에서는 기온과 강수를 Table

1과 같은 세 가지 구간으로 구분하고 있으며, 구간을 나누고 있는 기준값은 각각 과거 기온과 강수가 이루는 분포에서 상위 30%, 중위 40%, 하위 30%에 해당하는 분위값(quantile)을 평균에 대한 차 또는 비율로 나타낸 것이다. 기상청에서는 실제로 예보 시 3개의 구간(category) 중 발생확률이 가장 큰 구간을 예측하는데, 이는 EC(Environmental Canada)의 most-probable event 예보와 비슷한 방식이다. 그러나 비교형식의 예보는 전국을 대상으로 동일한 기준을 적용하여 예보하므로 상세한 지역적 기상변화에 대한 정보를 얻기 어렵다는 단점이 있지만, 본 연구에서는 서술형식 예보의 경우, 해석과정에 있어서 상당히 주관적일 수 있으므로 기준이 제시되는 비교형식의 예보를 유량예측에 활용하였다.

#### 2.1.2 Global Data Assimilation and Prediction System

기상청에서는 1988년 기상분석을 위한 컴퓨터를 도입한 이후, 1991년에 지역모형인 F-LAM(Limited Area Model)과 A-LAM을 운영하였으며, 1999년부터는 슈퍼컴퓨터를 도입하여 MIM5(Mesoscale Model 5)모형을 수행하고 있으며 매년 모형이나 운영체계를 업그레이드하고 있다. 현재 수치기상예보를 담당하는 수치예보과에서 운영 중인 모형들에는 중기예측을 위한 GDAPS 2종, 단기예측을 위한 RDAPS 3종 등 총 8종의 수치기상예측 모형들이 있다. 이 중 본 연구와 관련이 있는 전구모형(global model)인 GDAPS는 JMA 전구모형을 바탕으로 평균 해수면 기압, 강수, 850 hPa 기온, 700 hPa 이슬점 등을 예보한다. GDAPS의 예보기간(lead-time)은 예보시점부터 240시간까지 12시간 간격으로 하루에 두 번, 단일한 시나리오를 가진 확정론적(deterministic) 기상예보를 생산하고 있다. 격자(grid)크기는 슈퍼컴퓨터 1호기를 사용하던 2001년 이전에는 T106(110 km)이었으나 2001년 슈퍼컴퓨터 2호기를 도입하면서 T213(55 km)으로 해상도(resolution)가 높아져 더 상세한 기후예보를 생산하고 있다. GDAPS의 기후예보는 기상청 홈페이지에서 그래픽(graphic)화하여 제공되고 있다.

Table 1. Classification of monthly and 10-day forecast of temperature and precipitation

Classification	Probability	Temperature difference (°C)		Precipitation average year-ratio (%)	
		10-day	Month	10-day	Month
Above Normal	30 %	> 0.7	> 0.5	> 130	> 120
Normal	40 %	-0.7 ~ 0.7	-0.5 ~ 0.5	50 ~ 130	70 ~ 120
Below Normal	30 %	-0.7 <	-0.5 <	50 <	70 <

Source) <http://www.kma.go.kr>

## 2.2 기후예보의 정확성 검증

### 2.2.1 검증지역

기후예보의 정확성을 검증할 위해 충주댐 유역을 적용대상으로 선정하였다. 충주댐은 유역면적이 6,648 km<sup>2</sup>, 연평균 강수량은 1,197.6 mm, 연평균 유입량은 488.8백만 m<sup>3</sup>이며 소양강댐에 이어 두 번째로 많은 저수능력을 가지고 있다. 충주댐 유역은 우기인 6월에서 9월까지의 강수량이 808.0 mm로서 전체 강수량의 69.1%이고, 유입량은 1403.3 CMS로서 전체 유입량의 72.8%를 차지하고 있다.

### 2.2.2 월간산업기상정보의 예보정확성

본 연구에서 검증기간(1991년~2002년) 동안의 월간 산업기상정보는 산업기상허브(<http://industry.kma.go.kr>)와 기상청에서 보유하고 있는 자료를 수집·정리하여 사용하였으며, 월간산업기상정보의 정확성 검증은 다음과 같은 순서로 수행하였다. 우선 검증지역인 충주댐 유역의 과거(1966년~1990년) 실측강수와 기온자료를 이용하여 평년값을 산정하였다. 다음으로 검증기간 동안의 실측강수를 수자원종합정보 홈페이지(<http://www.wamis.go.kr>)의 티센계수를 이용하여 산정하였으며, 이를 위해 사용된 관측소는 고한, 영춘, 덕주사 등 건설교통부 소속 14곳과 기상청 소속 2곳이다. 실측기온을 산정하기 위해 사용된 관측소는 기상청 소속인 춘천과 충주 2곳이다. 다음으로 실측강수와 평년강수에 Table 1의 강수에 대한 분위값을 적용한 기준값을 비교하여 '평년보다 많음(높음)', '평년과 비슷', '평년보다 적음(낮음)' 등 3개의 구간으로 분류하였다. 예를 들면, 실

측강수가 10 mm, 평년강수가 8 mm라고 하면 강수량 평년비는 0.7과 1.2이므로 기준값은 5.6 mm와 9.6 mm가 된다. 이 기준값과 실측강수를 비교하면 실측강수가 9.6 mm보다 크므로 '평년보다 많음'으로 분류된다. 마지막으로, 분류된 실측강수의 구간과 월간산업기상정보의 강수예보를 비교·검증하였다. 실측기온의 경우도 실측강수와 동일한 과정을 수행하였다.

월간산업기상정보의 예보정확성을 검증하기 위해, 적중횟수(hit number)와 적중률(hit ratio)을 사용하였다. 적중횟수는 실측값이 예보한 상황(예, 평년보다 높음)에 일치한 경우에는 '1', 일치하지 않은 경우에는 '0'의 값을 부여한 후 이들을 검증기간 동안 모두 합한 지표이다. 종종 예보가 '평년과 비슷하거나 높음'으로 두 구간을 예보한 경우가 있어 이런 경우에는 '0.5'의 점수를 주었다. 적중률은 적중횟수를 총 검증기간으로 나눈 값을 의미한다. Table 2에 강수 및 기온의 연도별 적중횟수와 적중률, Table 3은 강수 및 기온의 계절별 적중률을 나타내었다.

Table 2의 연도별 강수예보에서는 월 적중률이 각 구간을 동일한 확률로 예보하는 초보예보의 적중률인 33.3%를 넘는 연도도 있으나 대부분 연도의 적중률이 33.3%보다 낮으며, 전체 평균도 27.9%로서 초보예보보다 낮았다. 상순 적중률의 전체평균은 월 적중률보다 높으나 마찬가지로 초보예보보다 낮았다. 기온예보는 대부분의 연도에서 월 적중률이 강수예보보다 뛰어났으며, 전체평균에서도 36.9%로서 초보예보보다 높아 예보로서 유효하였다. 또한 상순 기온에 대한 적중률의 전체평균도 42.8%로서 그 정확성이 훨씬 좋아짐을 알

Table 2. Yearly hit number and ratio of precipitation and temperature

Year	Precipitation				Temperature			
	Month hit #	Month hit ratio(%)	10-day hit #	10-day hit ratio(%)	Month hit #	Month hit ratio(%)	10-day hit #	10-day hit ratio(%)
1991	9	25.0	4	33.3	11.5	31.9	5.5	45.8
1992	12.5	34.7	3	25.0	14.5	40.3	5.5	45.8
1993	11	30.6	4	33.3	12.5	34.7	4	33.3
1994	9	25.0	4	33.3	12.5	34.7	7.5	62.5
1995	8	22.2	3.5	29.2	10.5	29.2	5.5	45.8
1996	9.5	26.4	3	25.0	15.5	43.1	7	58.3
1997	11	30.6	4.5	37.5	10.5	29.2	4	33.3
1998	10	27.8	3.5	29.2	13	36.1	6	50.0
1999	9.5	26.4	1.5	12.5	13.5	37.5	4.5	37.5
2000	12	33.3	5	41.7	14.5	40.3	5	41.7
2001	13	36.1	4.5	37.5	10.5	29.2	4	33.3
2002	6	16.7	2	5.6	20.5	56.9	5.5	45.8
<b>Ave.</b>	<b>10.0</b>	<b>27.9</b>	<b>3.5</b>	<b>28.6</b>	<b>13.3</b>	<b>36.9</b>	<b>5.3</b>	<b>44.4</b>

Note) Month contains the first, the second, and the last 10-day

Table 3. Seasonal hit ratio of precipitation and temperature

unit: %

Season	Precipitation		Temperature	
	Month	10-day	Month	10-day
Spring	27.3	31.9	38.9	37.8
Summer	30.6	34.7	41.9	37.9
Autumn	25.0	29.2	33.8	45.5
Winter	28.7	23.6	32.8	50.0
Ave.	27.9	29.9	36.9	42.8

수 있다. Table 3의 계절별 적중률에서 강수예보는 월이나 상순에서 대부분의 계절과 전체 평균에서 초보예보보다 좋지 않은 결과를 나타내었다. 하지만 여름철에는 상순에 대한 강수예보의 적중률이 34.7%를 나타내 초보예보보다 나은 결과를 보여 홍수기에 월간산업기상 정보가 유용하게 사용될 가능성이 있음을 확인하였다. 기온예보의 경우에는 전체평균에서 월과 상순예보 모두 초보예보보다 뛰어나 예보로서 유효함을 보였다.

### 2.2.3 GDAPS의 예보정확성

기상청 수치예보과에서 제공한 2000년~2001년까지의 GDAPS 자료를 사용하여 정확성 검증을 실시하였다. GDAPS의 해상도는  $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$ 이며, Fig. 1과 같이 한반도를 포함하는 격자의 수는 6개, 이에 포함되는 격자점(grid point)은 12개이다. 전구모델인 GDAPS의 격자는 매우 크기 때문에, 실제 우리나라 상공에는 4개의 격자와 3개의 격자점이 위치하고 있다.

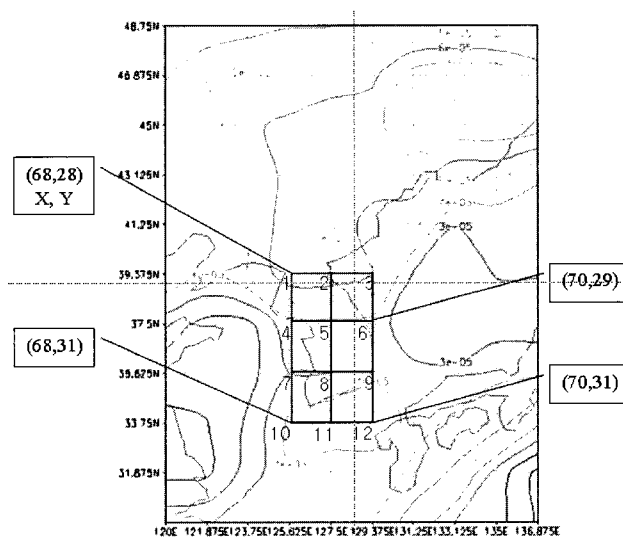


Fig. 1. GDAPS grid map

Note) X: GDAPS ordinate, Y: GDAPS abscissa

Table 4. Description of observed precipitation and temperature data for the GDAPS accuracy assessment

Subjects	Description
Grid points (GDAPS ordinate, GDAPS abscissa)	5(69,29), 6(69,30), 8(70,29), 9(70,30)
Latitude and longitude of grids	Latitude: 127.5°E ~ 129.375°E Longitude: 37.627°N ~ 37.5°N
Observed points in grid map	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Han river basin: MOCT: 36 points, K-water: 25 points, KMA: 3 points</li> <li>• Guem river basin: MOCT: 22 points, K-water: 15 points, KMA: 2 points</li> <li>• Nakdong river basin: MOCT: 99 points, K-water: 25 points, KMA: 5 points</li> </ul>

Note) MOCT: Ministry of Construction & Transpiration  
K-water: Korea water resources corporation  
KMA: Korea Meteorology Administration

GDAPS의 정확성 검증은 다음과 같은 순서로 수행되었다. 우선 GDAPS의 검증기간인 2000년~2001년 간의 실측강수와 기온의 값을 Table 4와 같이 준비하였다. Fig. 1에서 총주년을 포함하고 있는 격자점 5, 6, 8, 9로 이루어진 격자 내의 모든 관측소의 실측값을 사용하였으나, 관측소의 수가 매우 많고 격자 내 지역에 고루 분포되어 있으므로 티센망을 적용하지 않고 단순평균을 사용하였다. 다음으로 GDAPS가 12시간마다 생산되나 일단위의 실측값과 비교하기 위해 예보를 일단위로 변환하였다. 따라서 강수예보는 24시간마다 누적강수로 산정하였으며, 기온은 24시간마다 평균기온으로 산정하였다.

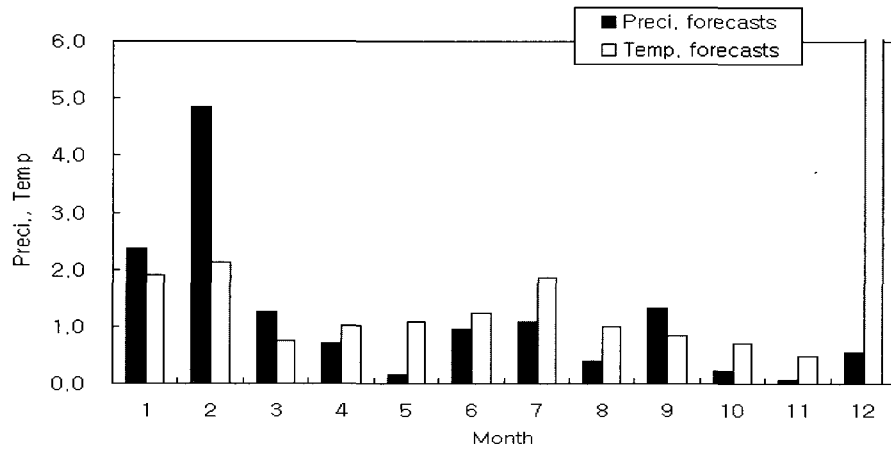
GDAPS의 예보정확성을 검증하기 위한 지표로서 R-Bias(Relative Bias)와 R-RMSE(Relative Root Mean Square Error)를 사용하였다. 모의월  $i$  ( $=1, \dots, n$ )에 대한 모의치를  $F_i$ , 실측치를  $Q_i$ 라 한다면,

R-Bias와 R-RMSE의 식은 다음과 같다.

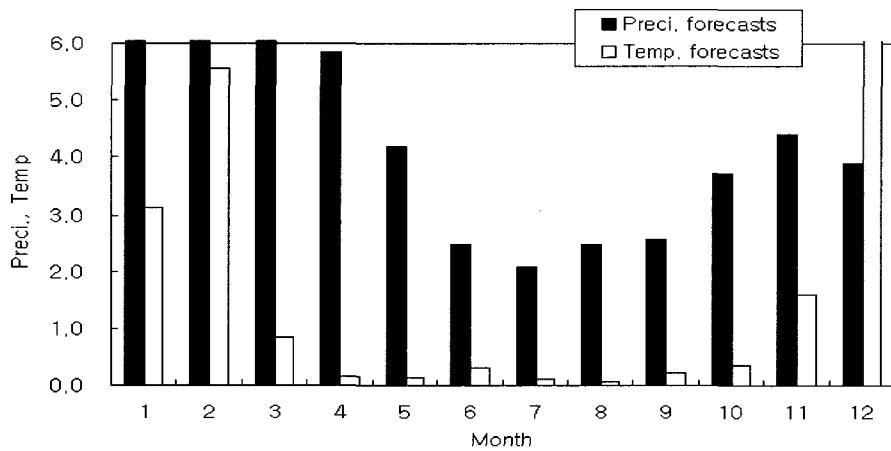
$$R-Bias = \frac{\sum_{i=1}^n F_i - \sum_{i=1}^n Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (1)$$

$$R-RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [F_i - Q_i]^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i} \quad (2)$$

Fig. 2는 순별 강수와 기온의 R-Bias와 R-RMSE를 월별로 정리한 것이며, 강수와 기온예보 모두 갈수기보다 홍수기의 정확성이 더 높아 본 연구의 목적인 홍수기 중장기 유량예측의 정확성 향상을 위한 기후예보로서 GDAPS가 효용성이 있음을 알 수 있었다.



(a) R-Bias



(b) R-RMSE

Fig. 2. Accuracy measures of the 10-day GDAPS forecasts

### 3. 기후예보를 이용한 유량예측

#### 3.1 강우-유출모형의 검증

기상예보를 이용한 유량예측의 효용성을 검증하기 위해, 강수와 기온자료가 1965년부터 존재하는 충주댐의 유입량을 예측하고 평가하였다. 강우-유출모형은 미국 공병단(Corps of Engineers)에서 1956년 처음 개발되어 저수지 조작, 대유역의 실시간 일유출예측 등의 목적으로 널리 사용되고 있는 SSARR(Streamflow Synthesis And Reservoir Regulation)모형을 사용하였다. 본 연구에서는 최근 한국수자원공사에서 수행한 '유역통합물관리를 위한 하천유출량 예측방안연구(2004)'의 과업에 적용된 SSARR모형을 직접 사용하였으며, 직접 매개변수 추정을 실시하지는 않았다. 그러나 유량예측의 적용에 앞서 SSARR모형의 모형오차를 검증하기 위해 Fig. 3 및 Table 5와 같은 비교와 정확도 평가를 실시하였다. 모형오차란 (입력오차가 없다고 가정) 실측강수를 모형에 입력하여 산출된 유량을 실측 유량과 비교하여 계산된 오차를 의미하며, 모형의 불확실성만을 고려한 것이다.

1986년부터 2003년까지의 충주댐 유역의 실측강수를 SSARR모형의 입력자료로 이용하여 충주댐 유입량을 모의한 후, 충주댐의 실측유입량과 비교하였다. Fig. 3은 모의기간 중 일부기간인 1996년부터 2003년까지의 충주댐 실측유입량과 SSARR모형의 모의유입량을 나타낸 그림이다. SSARR모형의 검증은 1986년부터 2003년까지의 실측유입량과 SSARR모형의 모의유입량을 이용하여 R-Bias와 R-RMSE로 평가하였으며 Table 5

에 그 결과를 나타내었다. SSARR모형은 봄, 여름, 가을철의 경우에는 강우의 변화를 잘 따라 유량을 모의하고 있으나, 겨울철에는 그 정확도가 높지 못하다는 결론을 내릴 수 있었다.

Table 5. Accuracy measures of the SSARR simulation

index Month	R-Bias	R-RMSE
Jan.	-1.063	1.474
Feb.	-0.832	1.009
Mar.	0.177	0.466
Apr.	0.496	0.578
May	0.366	0.491
Jun.	0.289	0.453
Jul.	0.285	0.333
Aug.	0.296	0.422
Sep.	0.302	0.471
Oct.	0.055	0.257
Nov.	-0.257	0.462
Dec.	-0.555	0.709

#### 3.2 월간산업기상정보를 이용한 앙상블 유량예측

##### 3.2.1 예측유입량 앙상블 생성

앙상블 유량예측은 기상정보를 이용한 확률론적 수문예측의 가장 대표적인 예라고 할 수 있다. 앙상블 예측은 과거의 기상패턴이 미래에 재현 가능하다는 가정을 기본전제로 한다. 즉, 과거에 발생한 모든 강우 시나리오를 미래에 일어날 가능성이 있다고 보고 강우-유출 모형에 입력하여 동일한 수의 유출 시나리오를 얻는 기

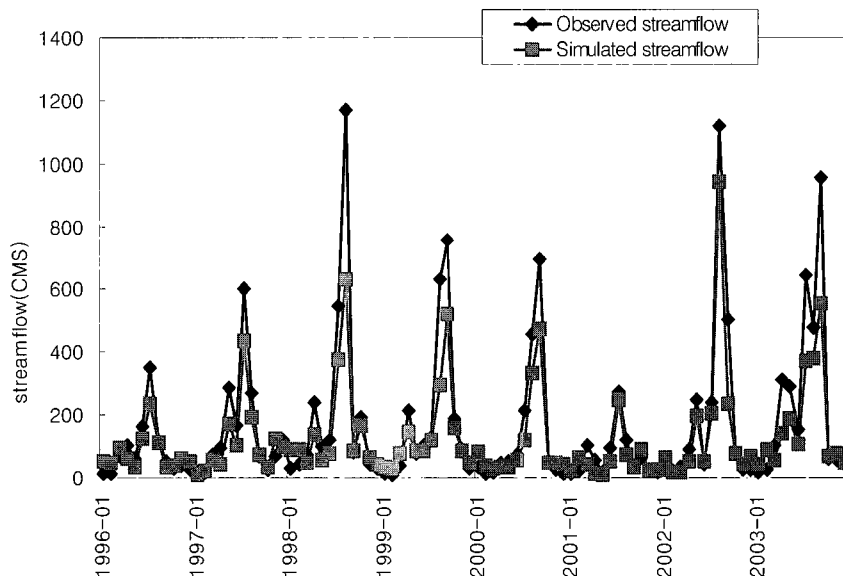


Fig. 3. Comparison of the SSARR simulated and the observed streamflow

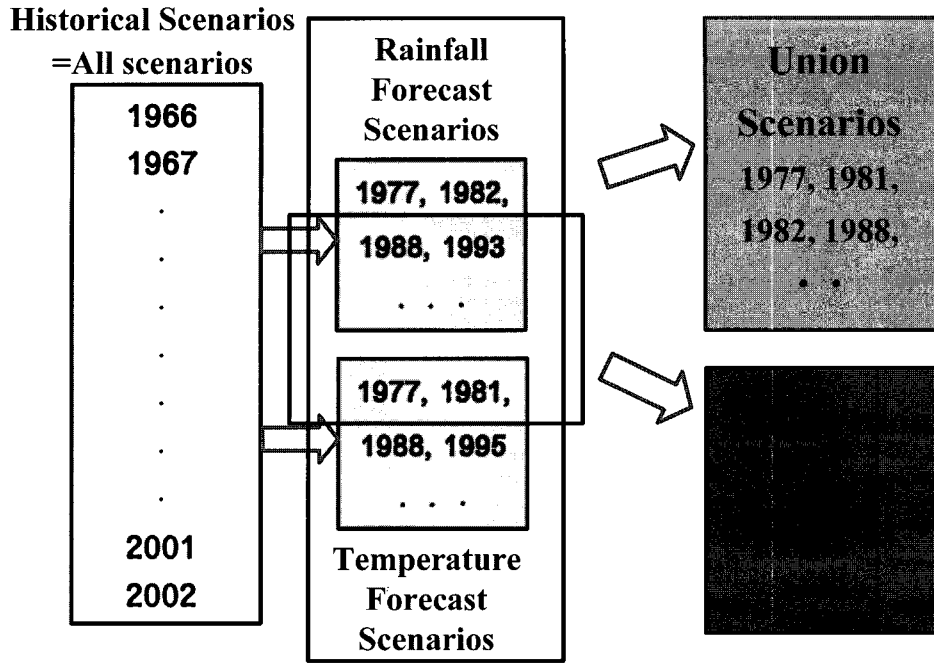


Fig. 4. Scenario selection process using MIMI

법이다. 예를 들면, 1981년부터 2000년까지 20년 동안의 1월 기상자료가 존재한다면 1981년부터 2000년까지 1월의 기상자료를 강우-유출모형에 입력하여 20개의 유출 시나리오를 얻는 기법이다. 앙상블 예측에서 중요한 사항 중 하나는 시나리오에 가중값을 부여하는 과정인데, 가장 단순한 방법은 앙상블 예측의 전통적인 가중개념으로서 예측시점을 기준으로  $n$ 개의 과거연도의 기상현상에  $1/n$ 의 동일한 확률을 부과하는 방법이다(정대일과 김영오, 2002a; 2002b).

월간산업기상정보를 이용한 앙상블 유량예측에서는 유량을 생성하기 위해 크게 두 개의 기후시나리오를 적용하였다. 첫 번째는 과거 모든 기후시나리오를 적용하는 방법(이하 '전체 시나리오')이며, 두 번째는 기후예보에 해당하는 과거 기후시나리오만을 선택하여 적용하는 방법이다. 특히, 후자의 방법에서는 강수예보와 기온예보에 의해 선택된 과거 기후시나리오 중, 공통된 시나리오집합을 '교집합 시나리오', 선택된 모든 시나리오집합을 '합집합 시나리오'로 명하였다. 시나리오 선택과정을 설명하면, 우선 입력된 과거 강수시나리오를 연도별, 월별로 정리하고 정리된 강수자료를 크기 순으로 정렬하여 상위 30%, 중위 40%, 하위 30%로 나눈 후 예보에 해당하는 시나리오만 선택한다. 예를 들어 상위 30%에 1991년과 1992년, 중위 40%에 1993년과 1994년, 하위 30%에 1995년과 1996년이 속하고 강수가 '평년보다 많음'으로 예보되었다고 하면, 과거 시나리오에서 상위 30%에 해당하는 1991년과 1992년이 강수시나

리오로 선택되는 것이다. 기온 시나리오도 기온예보를 이용하여 동일한 방법으로 시나리오를 선택되었다. Fig. 4는 이러한 시나리오 선택과정을 나타내고 있다.

예측유입량 앙상블 생성하기 위해, SSARR모형을 이용하여 1991년~2002년까지 12년간의 예측을 실시하여 예측유입량 앙상블을 생성하고 이를 실측유입량과 비교하였다. 예측유입량 앙상블을 생성하기 위해서 1966년부터 1990년까지 25개의 과거 강수와 기온앙상블을 SSARR모형에 입력하여 예측년도(1991~2000)의 매월마다 25개의 유입량 앙상블을 생성하였다. 여기서 예측시점의 토양함수 등의 초기조건은 예측시점에서 1년 전부터의 과거 강수자료를 SSARR모형에 입력하여 설정되도록 하였다.

### 3.2.2 앙상블 유량예측의 정확성 평가

충주댐의 앙상블 유량예측 정확성을 평가하기 위해, 유입량 발생구간을 3개의 구간으로 나누고 각 구간의 발생확률을 계산하여 제시하는 구간확률예측을 실시하였다. 먼저 예측구간을 나누기 위해 충주댐 과거 유입량의 적합분포를 선정하고 누가확률 33.3%와 66.7%에 해당하는 유량(각각  $q_{33.3}$ 과  $q_{66.7}$ )을 기준으로 저수(low flow), 중수(normal flow), 풍수(high flow)로 나누었다. 만일 별다른 예측기법이 존재하지 않는다면 미래유량은 이러한 과거자료에 의존하여 각 구간에 대하여 동일하게 33.3%의 확률로 예보하여야 할 것이며, 이를 '초보예측(naive forecasts)'이라 한다(김영오 등,



Table 6. Average hit score by scenario

Month \ Scenarios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ave.
All	30.5	24.8	51.2	31.8	44.4	30.4	36.7	32.3	45.7	45.3	55.5	38.1	<b>38.9</b>
Intersection	20.4	17.2	45.2	<b>37.4</b>	<b>48.6</b>	<b>33.8</b>	<b>40.1</b>	<b>43.1</b>	33.4	34.9	<b>61.0</b>	<b>39.0</b>	<b>37.7</b>
Union	29.4	20.3	47.5	31.7	<b>47.9</b>	<b>30.7</b>	33.4	<b>33.4</b>	43.7	41.9	<b>64.0</b>	<b>33.8</b>	<b>38.6</b>

Note) **Bold**: AHS larger than the AHS of all scenarios

2001). 다음으로, 앙상블 유량예측의 정확성을 평가하기 위한 지표로 평균예측점수(average hit score)를 사용하였다. 앙상블 유량예측의 평균예측점수가 33.3보다 크면 전체적인 유량예측은 초보예측보다 정확하여 유량예측으로서 유효하다고 할 수 있다. 충주댐의 과거유입량을 이용하여 각 예측월의 적합분포를 선정하고  $q_{33.3}$ 과  $q_{66.7}$ 을 구하여 예측구간을 설정하였다. Table 6은 각 시나리오의 월별 평균예측점수를 나타낸 표이다. 전체, 교집합, 합집합 시나리오의 평균예측점수가 각각 38.9, 37.7, 38.6으로 모두 초보예측보다 정확성이 높음을 확인하였다. 하지만 기후예보에 따라 구성된 교집합, 합집합 시나리오가 전체 시나리오보다 좋지 않은 예측을 보였으나 홍수기인 6월~8월에는 교집합, 합집합 시나리오의 평균예측점수가 더 큰 점수를 나타냈다. 따라서 기후변수의 불확실성에서 발생하는 오차가 큰 홍수기의 경우 기후예보를 이용하면 월 유량예측의 정확성이 향상될 수 있음을 증명하였다.

### 3.3 GDAPS를 이용한 유량예측

#### 3.3.1 예측유량의 생성

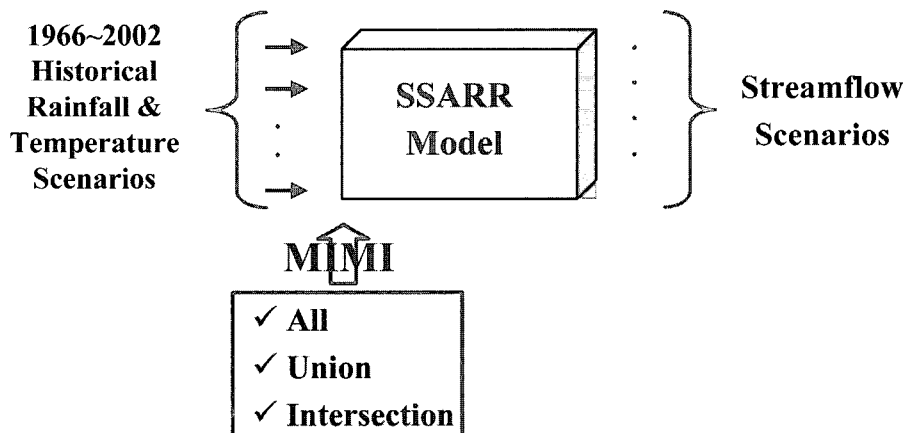
GDAPS는 확정론적 예측이므로 강수와 기온예보가 앙상블이 아닌 단일 시나리오로 구성되어 있다. 이 단

일 강수와 기온예보 시나리오를 직접 SSARR모형의 입력변수로 입력하면 단일한 유량예측 시나리오를 생성하여 유량예측을 수행할 수 있다. 우선 각 격자점의 GDAPS를 SSARR모형에 적용하기 위하여 각 격자점과 충주댐 유역의 각 소유역 중심과의 거리에 따라 격자점에 가중치를 주었으며, 가중치 산정을 위해 Eq. (3)과 같은 역거리가중법(inverse distance weighting)을 사용하였다.

$$w_i = \frac{\frac{1}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} \quad (3)$$

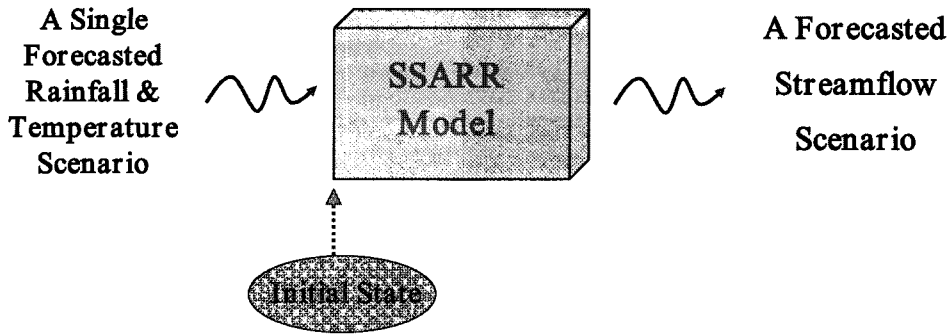
여기서,  $d_i$ 는 격자점과 유역중심간의 거리(m)를 나타낸다.

먼저 순별 유량예측에서는 각 격자점의 강수 및 기온예보에 가중치를 적용하여 단일한 강수 및 기온 입력 자료를 생성하였으며, 이를 SSARR모형의 입력변수로 하여 최종적으로 순별 유량예측을 수행하였다. Fig. 5에는 월간산업기상정보를 이용한 앙상블 유량예측과 GDAPS를 이용한 유량예측의 과정을 나타내고 있다.



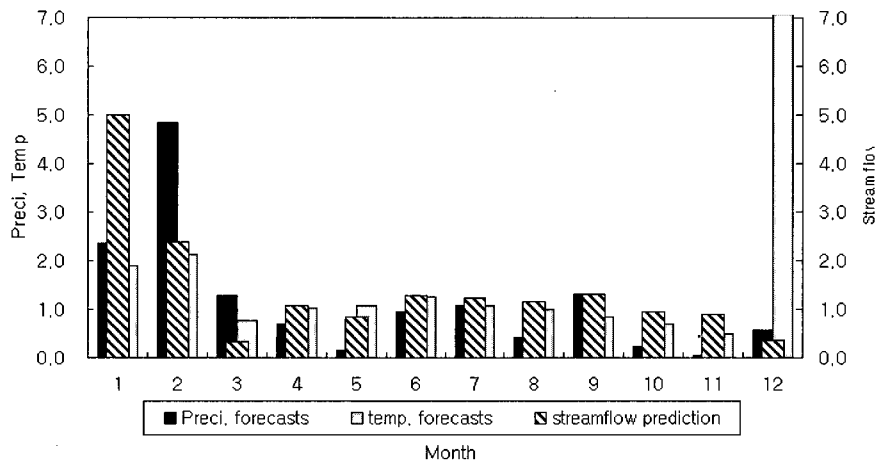
(a) Inflow prediction ensemble generation using MIMI

Fig. 5. Streamflow prediction using MIMI and GDAP(continued)

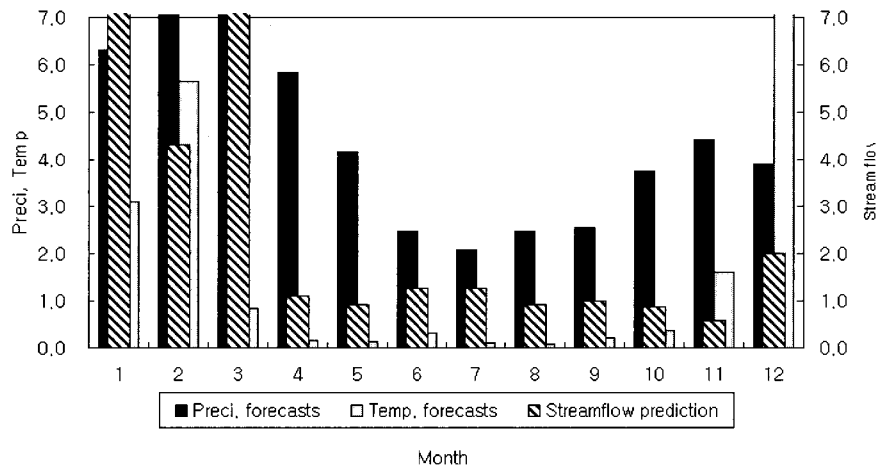


(b) Streamflow prediction generation using GDAPS

Fig. 5. Streamflow prediction using MMI and GDAP



(a) R-Bias



(b) R-RMSE

Fig. 6. Accuracy measures of the 10-day steamflow prediction

### 3.3.2 유량예측의 정확성 평가

Fig. 5는 월간산업기상정보와 GDAPS를 이용한 유량 예측의 차이점을 비교한 그림이고, Fig. 6은 순별 유량 예측의 정확성 평가한 것이다. R-Bias와 R-RMSE에서는 갈수기보다 홍수기에 정확성이 더 높은 것을 확인할 수 있으며, 특히 홍수기의 정확성이 갈수기보다 2배 이

상 높아 홍수기의 유량예측의 정확성이 갈수기에 비해 매우 뛰어나다는 것을 알 수 있다. 또한 강수와 기온예보의 정확성이 높은 홍수기에 유량예측의 정확성도 비례하여 높아지므로, 유량예측의 정확성이 강수와 기온예보의 정확성에 매우 민감하게 반응함을 알 수 있다. 따라서 홍수기에 GDAPS를 이용한다면, 월 유량예측의 정확성

을 향상시킬 수 있음을 증명하였다.

#### 4. 결론 및 향후연구

본 연구는 우리나라 중장기 유량예측을 향상을 위해 국내에서 사용가능한 기후예보에 대하여 조사하였으며, 적용 가능한 기후예보로서 월간산업기상정보와 GDAPS을 선택하였다. 선택된 기후예보의 예보형식, 예보기간, 구성 등을 살펴보았으며, 각 기후예보에 맞는 정확성 평가지표를 사용하여 예보정확성을 평가하였다.

월간산업기상정보는 강수예보에서 월 및 상순의 적중률이 초보예보보다 낮게 나타나 예보로서의 효용성이 낮음을 나타내었으나, 기온예보에서는 월 및 상순의 적중률이 초보예보보다 뛰어나 예보로서 유효함을 알 수 있었다. 하지만 계절별로 평가를 해본 결과, 여름철에 강수의 상순예보는 초보예보보다 정확성이 높아 기상예보로서 유효함을 확인하였다. GDAPS의 순별 예보도 역시 갈수기보다 홍수기에 예측정확성이 뛰어난 것으로 나타났다.

기후정보를 이용한 유량예측 방안을 수립하고 중주댐의 유입량을 예측하였다. 월간산업기상정보의 경우에는 과거 모든 기후시나리오를 사용하는 전체 시나리오와 기후예보에 해당하는 기후시나리오만을 선택한 교집합 시나리오와 합집합 시나리오로 나누어 비교하였다. 세 경우 모두 평균예측점수가 초보예측보다 높게 나타나 유량예측으로서 유효함을 증명하였으나, 기후예보를 사용한 교집합과 합집합 시나리오의 경우 전체 시나리오보다 낮은 정확성을 나타내었다. 하지만 홍수기에는 교집합과 합집합 시나리오가 전체 시나리오보다 평균예측점수가 높아, 홍수기에 기후예보를 사용한 월 유량예측이 효용성이 있음을 증명하였다. GDAPS를 이용한 순별 유량예측은 갈수기보다 홍수기에 2배 이상 정확성이 높으므로 홍수기에 기후변수의 불확실성에 대한 오차를 줄여 유량예측의 정확성이 향상될 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 기후예보의 정확성이 높아지면 유량예측의 정확성 또한 높아짐을 확인하였으므로 보다 정확한 기후예보의 확보가 앞으로 더욱 중요할 전망이다. 최근 제시되고 있는 GDAPS(중기)+월간산업기상정보(장기), RDAPS(단기)+GDAPS(중기)+월간산업기상정보(장기) 등 사용가능한 기후정보 간의 적절한 조합을 통해 정확성이 높은 기상정보를 확보하는 방법도 가능할 것이다. 또한 기후예보를 사용한 중장기 유량예측을 전국에 걸쳐 체계적으로 확대 적용하여 일반적인 결과를 도출하는 연구도 앞으로 지속적으로 수행되길 기대한다.

#### 감사의 글

본 연구는 BK21 서울대 사회기반 및 건설기술사업단과 서울대학교 공학연구소의 지원에 의해 수행되었으며, 기상정보를 제공해주신 기상청의 수치예보과와 기상정보를 분석해주신 서울대학교 수치예보실험실에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- 강인식, 허창희 (1992). "한반도 여름철 강수량의 장기 예측." **한국기상학회지**, 제20권, 제3호, pp. 283-292.
- 김영오, 정대일, 김형섭, 이길성 (2001). "양상불 예측을 통한 물공급전망 개선방안." **2001년 학술발표회 논문집(1)**, 한국수자원학회, pp. 304-308.
- 신현석, 정상민 (2000). "엘리뇨/라니냐 영향 지수기법의 개발 및 한반도 수자원에의 영향분석." **2000년 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 327-332.
- 정대일, 김영오 (2002a). "양상불 예측을 이용한 중주댐 월 유입량 예측." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제22권, 제3-B호, pp. 321-331.
- 정대일, 김영오 (2002b). "기상확률예보를 이용한 양상불 예측." **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1150-1160.
- 정창삼, 허준행, 배덕효 (2004). "국내유역에 대한 GCM 정보의 확률론적 불확실성분석." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제3호, pp. 137-184.
- 한국수자원공사 (2004). **유역통합물관리를 위한 하천 유출량 예측방안 연구**. 건설교통부.
- Bradley, A. A. and Schwartz, S. S. (2004). "Potential impact of climate forecast information on ensemble streamflow predictions made using trace weighting." **2004 Joint Assembly, AGU, Montreal, Canada**, pp. JA223.
- Croley II, T. E. (1996). "Mixing probability meteorology outlooks in operational hydrology." **Journal of Hydrologic Engineering, ASCE**, Vol. 2, No. 4, pp. 161-168.
- Croley II, T. E. (2001). "Climate-biased storm-frequency estimation." **Journal of Hydrologic Engineering, ASCE**, Vol. 6, No. 4, pp. 275-283.
- Croley II, T. E. (2003). "Weighted-climate parametric hydrologic forecasting." **Journal of Hydrologic Engineering, ASCE** Vol. 8, No. 4, pp. 171-180.
- Fortin, V., Evora, N., Perreault, L. Trinh, N., Favre, A., and Benoit, H. (2004). "Ensemble streamflow

- predictions: From climate scenarios to probabilistic weather predictions." *2004 Joint Assembly*, AGU, Montreal, Canada, pp. JA196-JA197.
- Kim, Y.-O., Jeong, D. I., and Kim, H. S. (2001). "Improving water supply outlooks in Korea with ensemble streamflow prediction." *Water International*, Vol. 26, No. 4, pp. 563-568.
- Lou, L., Wood, A. W., Wood, E. F., and Lettenmaier D. P. (2004). "An experimental seasonal streamflow prediction system and the streamflow predictability over the Ohio river basin." *2004 Joint Assembly*, AGU, Montreal, Canada, pp. JA223.
- Ntelekos, A. A., Ciach, G. J., Georgakakos, K. P., and Krajewski, W. F. (2004). "Uncertainties in surface runoff forecasts driven by probabilistic quantitative prediction estimates." *2004 Joint Assembly*, AGU, Montreal, Canada, pp. JA222-JA223.
- Piechota, T. J., Dracup, J. A., Chiew, F. H. S., and McMahon, T. A. (1998). "Seasonal streamflow forecasting in eastern Australia and the El Nino-southern oscillation." *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 11, pp. 3035-3044.
- Piechota, T. J., Dracup, J. A., Chiew, F. H. S., and McMahon, T. A. (2001). "Development of exceedance probability streamflow forecast." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 6, No. 1, pp. 20-28.
- Shaake, J. and Larson, L. (1998). "Ensemble streamflow prediction(ESP); Progress and research needs." *Preprints Special Symposium on Hydrology*, AMS, Boston, MA, USA.
- Sharma, A. (2000). "Seasonal to interannual rainfall probabilistic forecasts for improved water supply management: Part 1-A strategy for system predictor identification." *Journal of Hydrology*, Vol. 239, No. 1-4, pp. 232-239.
- Stedinger, J. R. and Kim, Y.-O. (2002). "Updating ensemble probabilities based on climate forecasts." *Conference on Water Resources Planning and Management and Symposium on Managing the Extreme Floods and Drought*, EWRI, ASCE, Roanoke, VA, USA, CD.
- Verbunt, M., Walser, A., Montani, A., and Schar, C. (2004). "Probabilistic runoff forecasting using a limited-area ensemble prediction system." *2004 Joint Assembly*, AGU, Montreal, Canada, pp. JA196.

(논문번호:05-115/접수:2005.08.08/심사완료:2006.08.09)