

확률론적 중장기 댐 유입량 예측

(II) 앙상블 댐 유입량 예측을 위한 GDAPS 활용

Probabilistic Medium- and Long-Term Reservoir Inflow Forecasts

(II) Use of GDAPS for Ensemble Reservoir Inflow Forecasts

김진훈* / 배덕효**
Kim, Jin-Hoon / Bae, Deg-Hyo

Abstract

This study develops ESP (Ensemble Streamflow Prediction) system by using medium-term numerical weather prediction model which is GDAPS(T213) of KMA. The developed system forecasts medium- and long-range exceedance probability for streamflow and RPSS evaluation scheme is used to analyze the accuracy of probability forecasts. It can be seen that the daily probability forecast results contain high uncertainties. A sensitivity analysis with respect to forecast time resolution shows that uncertainties decrease and accuracy generally improves as the forecast time step increase. Weekly ESP results by using the GDAPS output with a lead time of up to 28 days are more accurately predicted than traditional ESP results because conditional probabilities are stably distributed and uncertainties can be reduced. Therefore, it can be concluded that the developed system will be useful tool for medium- and long-term reservoir inflow forecasts in order to manage water resources.

keywords : ESP, reservoir inflow, medium- and long-term, probability forecast, GDAPS

요 지

본 연구에서는 GDAPS(T213) 중기 기상 수치예보 자료를 활용한 ESP (Ensemble Streamflow Prediction) 기법을 개발하여 미래에 발생할 수 있는 댐 유입량의 중장기적 확률예측을 위해 초과 확률구간별 댐 유입량을 예측하고 RPSS 검증기법으로 예측결과의 정확도를 분석하였다. 개발된 ESP 시스템을 적용한 결과 일단위 개념의 확률예보는 높은 불확실성을 내포할 수 있고, 중장기 확률예보에 초점을 맞추어 1, 3, 7일 등의 예측시간 해상도에 대한 ESP 정확도의 민감도를 분석한 결과 예측시간 해상도 간격이 증가할수록 예측결과의 불확실성이 감소하면서 그 정확도가 전반적으로 증가함을 살펴볼 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 GDAPS 자료를 활용한 1주 단위의 한달(28일)예보를 수행한 ESP 결과는 각 초과 확률구간 분포의 적절한 증가 및 감소로 인하여 그 시간적 변동성이 안정적으로 예측되고 예측결과의 불확실성을 감소시킬 수 있어 그 활용가치가 높은 것으로 나타났다. 이러한 관점에서 본 연구의 ESP 시스템은 중장기적 측면에서 GDAPS 자료의 활용가치를 높일 수 있고, 기존 ESP 결과보다 향상된 정확도로 댐 유입량을 예측할 수 있으므로 실시간 댐 유입량 예측에 적용한다면 수자원 관리 차원에서 유용한 수단이 될 수 있을 것이다.

핵심용어 : ESP, 댐 유입량, 중장기, 확률예보, GDAPS

* 세종대학교 토목환경공학과 박사과정
Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg., Sejong University, Seoul 143-747, Korea
(e-mail: jhcnu@chol.com)

** 세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 부교수
Associate Professor, Water Resources Institute, Dept. of Civil & Envir. Engrg., Sejong University, Seoul 143-747, Korea
(e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

1. 서 론

최근 국내 기상청은 슈퍼컴퓨터의 도입과 기상분야의 지속적 연구성과의 향상으로 단기, 중기, 장기에보 등 예측기간별 수치 및 통계 강우예보자료의 정확도가 매우 향상되었다. 이러한 기상정보들을 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. 이러한 기상 대기모델 예측자료를 활용하여 유량해석을 수행한 대기-유량 결합모델의 연구가 다수 존재하는데(Pereira Fo et al., 1999; Benoit et al., 2000), Kim et al.(2000)과 Chang et al.(2004)은 지역적 대기모델의 결과가 하천유출량에 미치는 영향을 검토하기도 하였고, Leavesley et al.(1992)은 기후변화가 지역적 수문순환 및 수자원에 미치는 영향을 검토하기도 하였다. 국내의 경우 장기호 등(2002)이 METRI-meso 대기모델을 활용하여 평창강 유역에서의 유출량 해석을 수행하였고, 김진훈 등(2005)은 기상청 단기 수치예보 모델인 RDAPS 자료를 활용하여 저류함수모형으로 유량해석을 수행한바 있다.

본 연구에서는 이러한 기상자료 활용측면에서 앞선 논문 I의 준분포형 TOPMODEL의 장기유출 모의결과 및 구축자료를 기반으로 앙상블 유량예측(Ensemble Streamflow Prediction, ESP) 기법을 활용하여 미래에 발생할 수 있는 댐 유입량의 중장기적 확률예측에 관한 연구를 수행하고자 한다. 기존 ESP 기법은 과거의 기상조건이 미래에 재현될 수 있다는 개념을 바탕으로, Croley(2000)는 확률론적 장기 기상 예측자료를 이용하여 하천유출량 앙상블에 재현 가능성을 높이고자 가중치를 부여할 수 있는 기법을 제시하기도 하였다. 또한 최근에는 중기(medium-range) 기상 수치예보자료를 활용하여 ESP 정확도를 향상시키기 위한 연구(Werner et al., 2005; Clark and Hay, 2004)가 진행되고 있다. 본 연구에서는 국내 기상청에서 생산되고 있는 GDAPS(T213) 수치예보자료를 활용하여 실시간(일단위) 개념의 ESP 확률예보를 수행하고 그 활용성을 검토하고자 한다.

본 논문의 2장에서는 ESP 기본개념 및 본 연구를 위해 구축된 ESP 중장기 확률예보 시스템을 설명하고 시스템의 구성요소인 기상청 GDAPS 자료, 가중치 부여 기법, 확률론적 예보기법 및 평가방법 등에 대한 기본이론을 기술하였다. ESP 기법을 이용한 확률론적 댐유입량 예측의 적용사례는 3장에 설명하였는데, 여기에는 ESP 확률예보기법이 내포할 수 있는 불확실성, 예보시

간 해상도에 대한 민감도 분석, 기상 수치예보자료를 이용한 가중치 부여 전후의 정확도 개선결과 등을 포함한다. 이러한 결과들을 정리하고 예상되는 향후계획을 4장에 제시하였다.

2. 기본이론

2.1 앙상블 유량예측(ESP) 시스템

앙상블 유량예측은 예측시점의 적설량, 토양함수, 하천의 수위, 습도 등 유역의 상태를 나타내는 초기조건과 확률적 대표성을 갖는 미래에 재현 가능한 과거 기상자료를 결합하여 확률론적 예측이 가능한 기법이다. 즉 앙상블 예측은 강우-유출모형에 미래에 발생할 가능성이 있는 모든 강우 시나리오를 입력하여 그 결과물로서 다수의 유량 시나리오를 얻을 수 있다. 유출모형의 초기조건은 예측하는 시점에 따라 변하므로, 동일한 강우 앙상블을 사용한다 하더라도 대상유역의 토양함수비, 기온, 습도 등과 같은 초기조건에 따라 유량 앙상블이 다르게 생성된다. 이와 같은 이유로 앙상블 예측은 조건부(conditional) Monte Carlo 모의로 간주되기도 한다(정대일, 2002).

본 연구에서 구축한 ESP 시스템은 Fig. 1과 같이 과거 30년 동안의 유역평균 강우량(MAP)과 잠재증발량(MET) 자료를 수문모형에 입력하여 유량 앙상블을 산출하는 과정으로 이루어진다. 예를 들어, 2003년 7월 1에 향후 30일 동안의 확률론적 하천유출량 예보를 수행하고자 할 경우에는 과거 1973~2002년 동안 관측된 7월 한달 동안의 일단위 MAP 및 MET 자료를 앞서 구축된 준분포형 TOPMODEL에 입력하여 $1/n(n=30)$ 의 확률을 가지는 30개의 하천유출량 앙상블을 대상유역의 동일 초기조건으로 생산하는 것이다. 이러한 기존 ESP 이론을 바탕으로 과거 30년 동안의 MAP 및 MET 앙상블 멤버 중 미래에 재현 가능성이 높은 멤버에 높은 확률을 주기 위해 Croley(2000)와 Clark and Hay(2004)의 연구에서처럼 기상 예보자료를 활용하였다.

본 연구에서 사용된 기상자료는 국내 기상청 현업에서 매일 12UTC에 10일 예보자료를 가지는 GDAPS T213(56×56km) 중기 수치예보모델 자료로써, 모델 출력변수 중 12시간 간격의 지표강수량 자료를 활용하였다. GDAPS 예측강수량 자료는 유역평균 강수량으로 변환되어 과거 30년 동안의 MAP 자료와 상관관계를 평가한 후, 상관성이 높을수록 보다 높은 재현확률을 부여하기 위해 선형 가중치 부여기법을 사용한다. 이렇게 가중치가 부여된 MAP 및 MET 자료는 대상유역의 동일 초기조건으로 수문모형에 입력되어 중·장기 확률

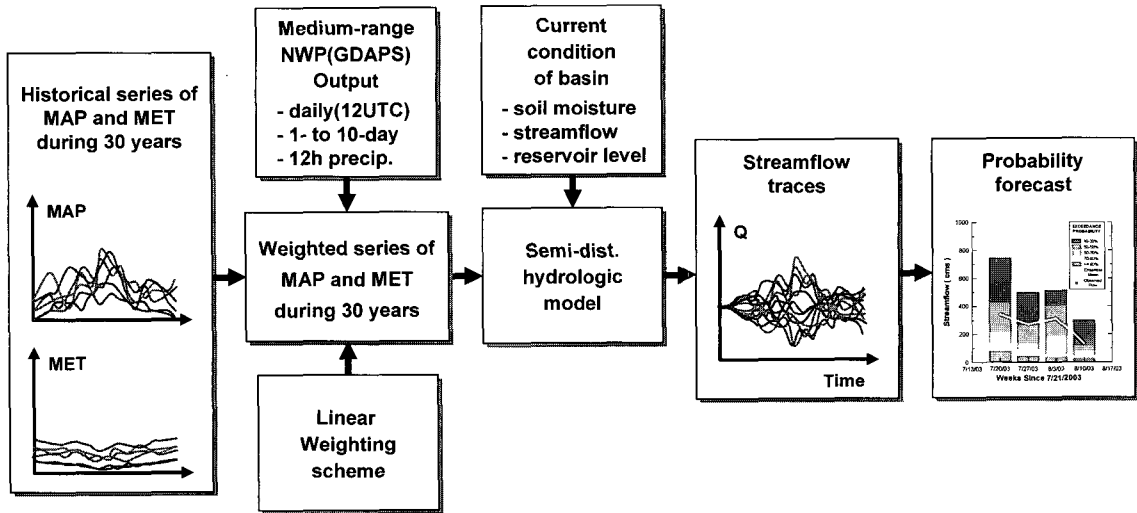


Fig. 1. ESP system with medium-range NWP(Numerical Weather Prediction) output to forecast probability of reservoir inflow

론적 하천유출량 예보를 위한 유출량 앙상블을 생성하게 된다. 이상과 같이 구축된 ESP 시스템의 구성요소들을 상세히 기술하면 다음과 같다.

2.2 GDAPS T213 수치예보모델

기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)에서는 Table 1과 같은 전지구예보모델(Global Data Assimilation and Prediction System, GDAPS)을 운영하여 중기(10일) 및 장기예보(1개월)를 수행하고 있으며 지역예보 모델의 초기 추정값과 측면 경계값을 제공하고, 전구분석 결과를 이용하여 분석일기도를 생산하고 있다. 모델은 해상도에 따라 T106과 T213이 운영되고 있으며, T106은 수평격자 간격이 약 110km이고 21개의 연직층으로 구성되고, T213은 약 55km 수평격자 간격에 30개의 연직층으로 구성되어 있다. 앙상블 예보는 T106을 사용하고 있으며 28일 예보를 수행하고 있다.

GDAPS 모델은 구면 조화함수를 기저함수로 사용하는 파의 형태로 기상 예측 변수를 표현하며, 시간과 공간에 대한 적분을 수행하기 위해 파형법(spectral method)을 사용하고 있다. 모형에서 사용되는 변수들은 수평적으로 구면 조화함수들의 진폭들로 표현되며, 동서방향의 최대 파수는 수평 분해능을 나타낸다. 현재

현업 운영 중인 전구모형은 T106으로 동서방향의 최대 파수는 106개이며 약 110km의 해상도를 가지고, T213은 동서방향의 최대 파수가 213개로 약 55km에 해당하는 2배의 수평 해상도를 가진다. 연직 좌표계는 하층에서 σ 좌표계, 상층은 압력 좌표계와 비슷하게 표현되는 하이브리드(hybrid) 좌표계(η 좌표계)를 이용한다. 이 좌표계는 하층 경계조건을 나타내고 험한 산악지대에서 압력 경도력의 유한차분 오차를 줄이는 이점이 있다(건교부, 2003).

본 연구에서 사용된 GDAPS T213 생산자료 특성은 파동의 형태로 예보된 자료이기 때문에 후처리 과정을 통하여 등압면, 등위경도 격자 자료로 변환된다. 이러한 격자 도메인(domain)은 전구를 포함하여 약 55km (0.562°) 격자간격으로, 640 × 321개의 격자수로 이루어져 있다. 자료의 (1,1)에 해당하는 격자점은 남반구의 90°S와 경도 0°(360°)이다. 또한, 연직층수는 17개 층으로 기압별로 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10mb 번으로 구성되어 있다. 자료의 생산은 하루 1번으로 12UTC이며, 24시간 예보까지는 3시간 간격의 예보자료이고, 그 이후부터 240시간(10일) 예보까지는 12시간 간격의 예보자료를 포함하고 있다.

GDAPS T213 자료 내에 포함되어진 변수는 Table 2

Table 1. Global NWP model of KMA

모델	수평분해 (연직층수)	운영횟수/일	예측 기간	비고
전지구예보 모델 (GDAPS)	55km(30층)	2회 (00, 12 UTC) 1회 (12UTC)	+3.5일 +10일	전지구 날씨
	110km(21층)	1회 (12UTC)	28일	앙상블 예측

Table 2. Variables produced by GDAPS T213

변수명	설명	차원	X	Y	Z	단위
APCPsfc	지표 누적강수	2	640	321	1	kg/m ²
DEPRprs	습수	3	640	321	8	K
DEPR2m	2m 고도 습수	2	640	321	1	K
HGTprs	지오폠펜셀고도	3	640	321	17	gpm
PRMSmsl	해면기압	2	640	321	1	Pa
RELVprs	상대와도	3	640	321	6	/s
TMPprs	기온	3	640	321	17	K
TMP2m	2m 고도 기온	2	640	321	1	K
UGRDprs	동서방향 바람	3	640	321	17	m/s
UGRD10m	10m 고도 동서방향 바람	2	640	321	1	m/s
VGRDprs	남북방향 바람	3	640	321	17	m/s
VGRD10m	10m 고도 남북방향 바람	2	640	321	1	m/s
VVELprs	연직 기압속도	3	640	321	11	Pa/s

와 같이 총 13가지로, 변수명에 sfc가 붙은 것은 지표에서의 변수값을 나타내고 prs가 붙은 것은 3차원 자료로 17개 등압면에서의 변수값을 나타낸다. APCPsfc는 지표 누적강수를 나타내는 것으로 본 연구의 선형 가중치 부여기법에 사용되었다. HGT는 지오폐텐셜 고도를 나타내고, DEPR는 습수(기온과 이슬점 온도와의 차이)로써 대기의 습한 정도를 나타낸다. PRMSmsl은 평균해면기압으로 평균 해수면 고도에서의 기압, TMP는 기온 값을 나타내는데, 17개 등압면과 2m 고도에서의 값이 생산된다. UGRD와 VGRD는 동서 및 남북방향의 바람을 나타내며, 17개의 등압면과 10m 고도에서의 값으로 생산된다. Fig. 2와 3은 GDAPS T213 생산 변수 중 강수량과 기온자료를 대표적으로 예시한 것이다. 여기서 강수량 예측자료는 본 연구의 중장기 확률예보를 위해 GRIB 원시자료로부터 추출하고 GDAPS 격자점

에 대한 티센망을 구축하여 유역평균 예측강수량 자료로 변환하였다(건교부, 2003).

2.3 선형 가중치 부여기법

GDAPS 수치 예보자료를 활용하여 ESP 멤버의 가중치를 산출하기 위해 선형 가중치 부여기법을 개발하였다. GDAPS의 강수량 예측자료에 대한 기상학적 및 수문학적 신뢰도 분석을 수행한 건교부(2003)의 연구에 따르면, 예측된 강수량자료가 기상학적으로 국지적인 강수의 분포나 강수량에 대한 비교보다는 한반도에 걸친 강수밴드의 위치예측에 보다 높은 신뢰성 있는 것으로 검토되었고, 유역평균 강수량을 계산하여 수행한 수문학적 분석에서는 AWS(Automatic Weather Station) 관측강우에 비해 매우 과소 모의하는 것으로 나타났지만 강수유무의 정성적 평가는 비교적 일치성을 보이는 것

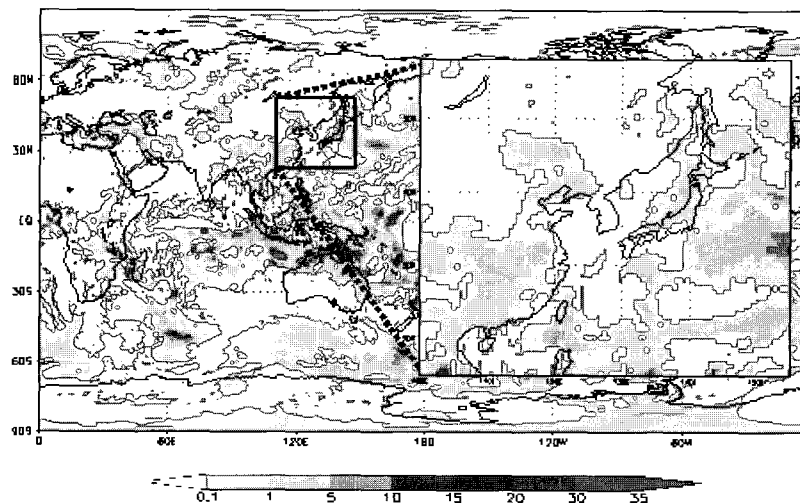


Fig. 2. Example of precipitation forecast data for GDAPS T213

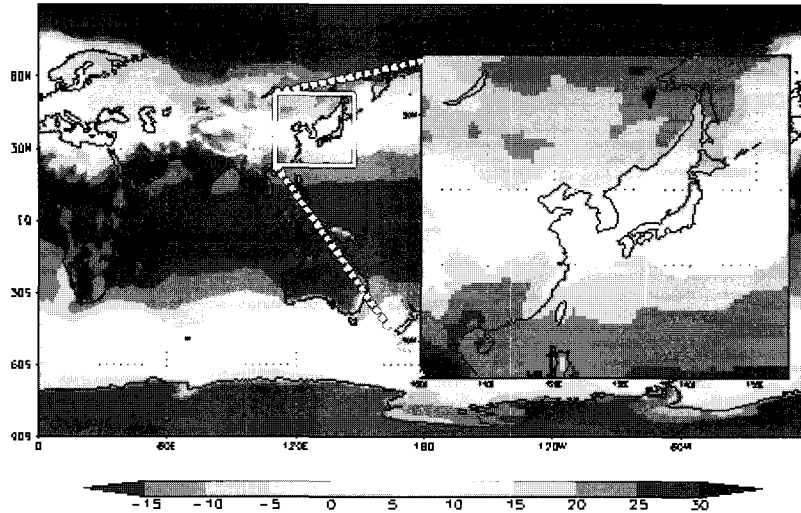


Fig. 3. Example of temperature forecast data for GDAPS T213

으로 분석되었기 때문에 강수패턴 예측정보는 비교적 사용가치가 높은 것으로 검토되었다. 따라서 본 연구에서는 관측 및 예측자료의 상관관계를 수치적으로 대표할 수 있는 상관계수(correlation coefficient, cc)를 Eq. (1)과 같이 계산하였다.

$$cc = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{R_0(i) - \overline{R_0}}{S_0} \right) \left(\frac{R_f(i) - \overline{R_f}}{S_f} \right) \quad (1)$$

여기서 $\overline{R_0}$, $\overline{R_f}$ 는 유역평균 강수량에 대한 관측과 예보값의 시간에 대한 평균을 나타내고, S_0 와 S_f 는 각각의 표준편차를 의미한다.

GDAPS 예측 강수와 과거 30년 동안의 MAP 앙상블 멤버 사이에서 계산된 Eq. (1)과 같은 상관계수는 그 상관성이 높을수록 보다 높은 가중치를 부여하여 미래의 재현확률을 높이하고자 하였으며, 여기에 사용된 가중치 부여기법은 선형적 기법으로 다음 순서에 따라 계산된다.

- 1) Eq. (2a)와 같은 상관계수 m 개를 가지는 벡터 X 를 Eq. (2b)의 오름차순 정렬 벡터로 생성한다.

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (2a)$$

$$\mathbf{N} = (x_{s_1}, x_{s_2}, \dots, x_{s_m}), x_{s_1} \leq x_{s_2} \leq \dots \leq x_{s_m} \quad (2b)$$

- 2) 정렬 벡터 \mathbf{N} 를 대상으로 가중치 벡터 $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ 의 모든 가중치는

Eq. (3)과 같이 계산된다.

$$w_j = \frac{s_j}{\alpha m} \quad (3)$$

여기서 α 는 가중치 부여기법의 매개변수로써 $\sum_{j=1}^m w_j = 1.0$ 을 만족하도록 추정되는데, 이러한 매개변수 α 의 적용은 매우 낮은 상관성(cc_l)을 보이거나, 상관성은 높으나 정량적 차이가 높게 발생하는 경우(cc_u), 즉 AWS 관측자료와 비교하여 강수패턴은 유사하나 정량적으로 과소 또는 과다 모의하는 경우에 앙상블 멤버를 제거한 유효개수 m' 에 대한 가중치 계산에서도 적용하여 상관계수의 물리적 단점을 보완한다. 이러한 매개변수는 장기간의 과거 GDAPS 자료로부터 경험적으로 추정할 수 있으며, GDAPS 자료의 신뢰도가 어느 정도 일관성을 유지한다면 대상유역별 고유 매개변수의 추정이 가능할 것이다.

Fig. 4는 본 가중치 적용사례를 나타낸 것으로 그림에 표현한 수식과 같이 선형함수를 가진다. 본 기법은 상관성이 높을수록 순차적으로 높은 가중치를 부여하기 때문에 단계별 상관성의 격차를 고려할 수 없으나 정량적으로 불확실성이 높은 GDAPS 자료를 활용하고자 할 때 매우 간단한 방법으로 사용될 수 있다.

2.4 확률론적 예보기법

본 연구에서는 기존 ESP 기법 및 GDAPS 강수 예측 자료를 활용한 유량 앙상블을 바탕으로 중장기적 하천 유출량 확률예보 정보를 생산하기 위해 미국 NWS에서

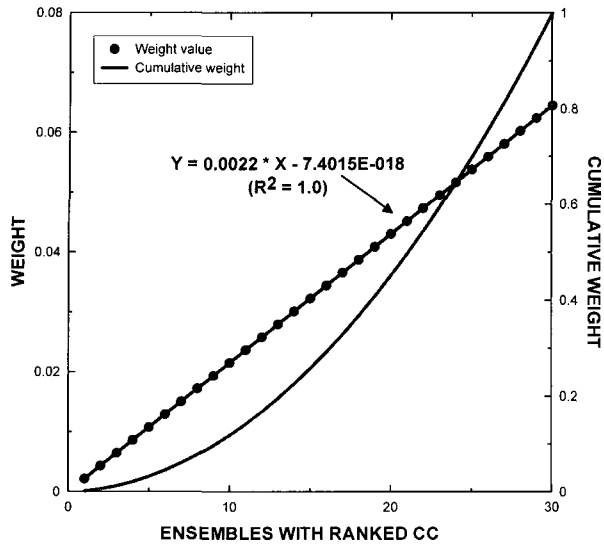


Fig. 4. Application result of linear weighting scheme. Weighted values are shown in dotted point. Solid line indicates cumulated weight

수행하는 초과(exceedance) 및 비초과(nonexceedance) 확률을 계산한다. n 개의 유량 시나리오 사이에서 누적 확률로 표현되는 비초과 확률을 확률분포예측(probability distribution forecast) $G_i(y)$ 로 정의하면 다음과 같다(Bradley et al., 2004).

$$G_i(y) = \text{Prob}\{Y_i \leq y | \xi_i\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

여기서 $\text{Prob}\{Y_i \leq y | \xi_i\}$ 는 ESP 기법으로 예측된 유량 앙상블 Y_i 가 기준유량 y 와 같거나 작을 확률을 나타내는 것으로 ESP 개념에서와 같이 과거 수문기 후학적(hydroclimatic) 정보 ξ_i 와 조건부적 관계를 갖는다.

Fig. 5는 하천유출량(cms)에 대한 비초과 확률의 적용 사례를 표현한 것으로 2003년 7월 21일부터 27일까지의 1주간 유출용적에 대한 앙상블 결과이다. 그림에서 사례 1은 동일 가중치가 부여된 기존 ESP 결과이고 사례 2는 GDAPS 강수 예측자료로 가중치가 부여된 앙상블 결과를 과거 관측유량 앙상블 결과(climatology)와 함께 나타내었다. 사례 1에서 약 70cms의 비초과 확률은 30%이지만 사례 2와 관측 앙상블의 동일 유량값에 대한 비초과 확률은 각각 26, 39%로 사례 1과 비교하여 확률의 범위가 변하는 것을 알 수 있다. 이러한 비초과 확률의 역개념(100%-비초과 확률)이 초과 확률로 계산되어 질 수 있으며 확률구간별 예측과 같은 다양한 예보가 가능하다.

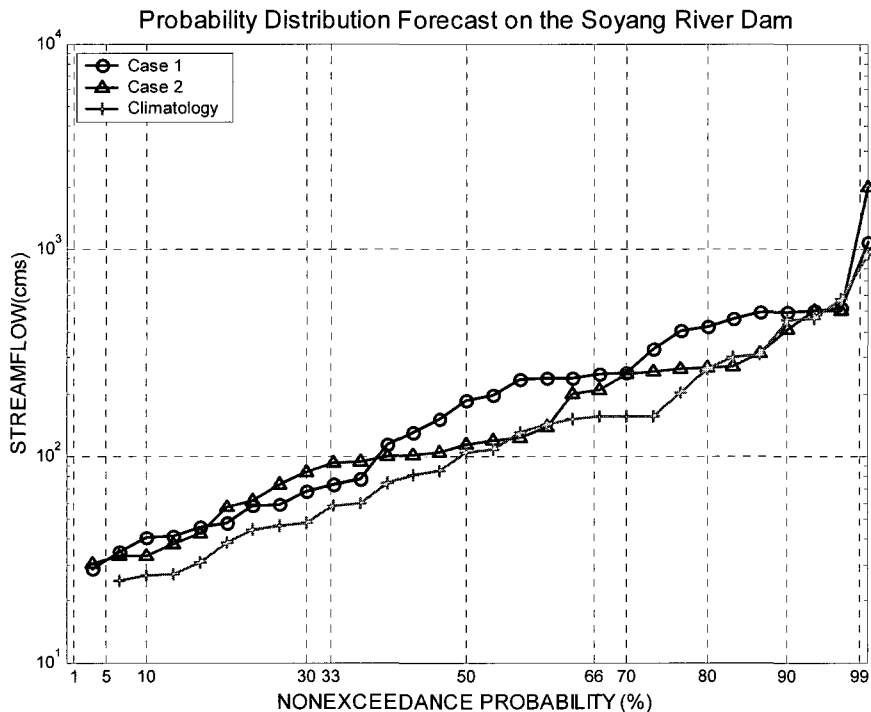


Fig. 5. Probability distribution forecast of 1 week streamflow volume since 21 July 2003 for the Soyang River watershed. Forecast are shown for cases 1, 2 and the empirical distribution of observed flows over the 30-yr verification period(climatology)

2.5 ESP 확률예보 정확도 분석기법

본 연구에서는 ESP 확률 예측결과의 정확도를 평가하기 위해 RPSS(Ranked Probability Skill Score) 기법(Epstein, 1969; Murphy 1969, 1971; Hersbach, 2000)을 이용하였다. RPSS는 확률예보 결과의 검토를 위해 사용되는 기법으로 다음 Eq. (5)와 같은 연속형 RPS(Ranked Probability Score)를 기반으로 계산된다.

$$RPS = \int_{-\infty}^{\infty} [P(x) - P_0(x)]^2 dx \quad (5)$$

여기서 $P(x)$ 는 변수 x (예, 일단위 하천유출량)의 예측 초과확률이고 $P_0(x)$ 는 x 에 대한 관측 초과확률을 의미한다. 특정일의 관측 유출량은 단일값을 가지므로 관측 확률은 0이거나 1이 된다. RPS는 예측확률이 관측확률보다 멀리 떨어질 경우 예측오차가 증가하므로 일종의 거리 민감도의 의미를 가진다. RPS를 기반으로 RPSS는 다음과 같이 주어진다.

$$RPSS = 1 - \frac{RPS_f}{RPS_{ref}} \quad (6)$$

여기서 RPS_f 는 Eq. (5)에서 검토되어지는 예측결과이고 RPS_{ref} 는 과거 유량 관측자료를 바탕으로 한 참조(reference) 예측결과를 나타낸다. RPSS는 1과 같거나 작은 값을 가지면서, 양(positive)의 RPSS는 참조 예측결과에 대한 향상률(%)를 의미하고 음(negative)의 RPSS는 참조 예측결과가 예측결과(RPS_f)보다 높은 신뢰도를 가지는 것이다.

3. ESP 기법을 이용한 확률론적 댐 유입량 예측

ESP 기법을 이용한 확률론적 댐 유입량 예측 적용연구를 소양강댐 상류유역을 대상으로 수행하였다. 소양강은 한강수계를 형성하는 북한강의 최대 지류이며 인북천 및 내린천의 두 지류로 구성되기 때문에 앞선 논문 I에서처럼 인북천, 내린천 및 소양강 유역으로 분할하여 유출모형을 적용하였다. 또한 본 연구에서는 상술한 바와 같이 논문 I에서 과거 30년 동안 구축된 유역 평균 강우량(MAP)과 잠재증발량(MET) 자료를 준분포형 TOPMODEL에 입력하여 동일 초기조건으로 유량 앙상블을 산출하는 기본과정으로 구성된다.

Fig. 6은 개발된 ESP 시스템을 바탕으로 2003년 5월 1일을 기준으로 150일 동안 예측된 유량 앙상블을 나타낸 것으로, 과거 30년 동안의 동일기간 MAP 및

MET를 입력(30개의 MAP 및 MET 입력 앙상블)하여 생산한 결과이다. Fig. 6에는 유량 앙상블과 함께 앙상블 평균 및 관측유량을 동시에 표현하였다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 과거 30년의 입력자료에 대한 일 단위 유량 앙상블은 매우 불규칙한 특성을 보이고 1/n의 동일 가중치가 부여된 앙상블 평균 또한 관측유량과 비교하여 대체적으로 과소모의되면서 실제 강수가 발생하여 유출수문곡선이 약 300cms 이상으로 형성될 경우 7월 이후로 예측시간이 길어짐에 따라 댐 유입량 예측에 매우 큰 불확실성이 존재할 수 있음을 보여준다. ESP 시스템에서는 이러한 불규칙성과 불확실성으로 인하여 2.4절에서 설명한 확률론적 예보기법이 필요하고 유량 앙상블 결과에 대한 초과 확률을 계산하여 임의 유출량을 넘어설 수 있는 가능성(possibility)을 제시하는 것이다.

제시된 일 단위 유량 앙상블에 대한 계급구간별 초과 확률을 계산하여 표현하면 Fig. 7과 같다. 본 연구에서는 초과 확률에 대한 5개의 계급구간(90%이상, 90~70%, 70~50%, 50~30%, 30~10%)으로 나누어 확률예보를 수행하였고, 이들 결과와 함께 앙상블 평균 및 관측유량을 그림에 표시하였다. 앙상블 평균의 경우 비교적 강수가 많은 7, 8, 9월에 초과 확률 30%를 경계로 그 보다 약간 낮은 초과 확률범위에 위치하고 있고 앙상블 평균에 근접한 계급구간의 범위가 비교적 넓게 분포함을 알 수 있다. 초과 확률 30%는 각 시간대에서 비교적 높은(비초과 확률 70%) 유량값을 의미하므로 우리나라의 여름철 풍수특성을 잘 반영하는 의미로 해석되고, 유량 계급구간의 분포가 넓다는 것은 Eq. (4)의 확률분포예측과 같이 앙상블의 일관성이 떨어진다는 의미이기 때문에 일 단위 개념의 확률예보가 높은 불확실성을 내포할 수 있음을 의미한다.

Fig. 7과 같은 일 단위 ESP 확률예보결과가 포함할 수 있는 불확실성을 보다 자세히 검토하기 위해 동일 기간의 댐 유입량 누적치를 Fig. 8에서와 같이 도시하였다. 그림에서 "Low Decile", "Median" 및 "High Decile"은 각 시간대 유량 앙상블에서 크기순 누적확률 10, 50, 90%에 해당하는 유량값의 누적치를 나타내고, 이와 동시에 앙상블 평균 및 관측유량의 누적치도 함께 표현하였다. Fig. 8의 결과는 Fig. 7의 결과와 유사하게 앙상블 평균이 누적확률 50%보다 높게 분포함을 알 수 있고 관측유량은 그 경사가 완만하다가 급해지는 불규칙한 형상을 가지면서 앙상블 평균과는 다소 차이가 나는 것으로 해석된다. 또한 누적확률 10%의 유량 누적치는 그 변화폭이 좁으면서 어느 정도 일관성을 유지하지만 누적확률 90%는 6월 중순 이후로 높

은 곡선경사를 가지기 때문에 두 곡선 사이의 변동간격이 시간이 지날수록 매우 넓어지는 것을 알 수 있다. 변동간격이 좁다면 그 만큼 확률예보의 정확도를 높일 수 있지만 우리나라의 여름철 강수조건이 일단위 개념에서 매우 불규칙하기 때문에 발생 가능한 불확실성을 파악하는 것은 ESP 예보에서 매우 중요한 자료로 활용될 수 있다.

본 연구에서 개발한 ESP 시스템은 예측의 정확도를 높이고자 GDAPS 수치예보 자료를 활용하여 재현확률이 높다고 판단되는 유량 앙상블에 가중치를 부여할 수 있기 때문에 ESP 예측결과가 가질 수 있는 불확실성을 줄이는데 기여할 수 있다. 또한 본 연구에서는 중기 기상 수치예보 자료를 활용하여 중장기 댐 유입량 확률예측에 연구초점을 두고 있기 때문에 일단위의 확률예측

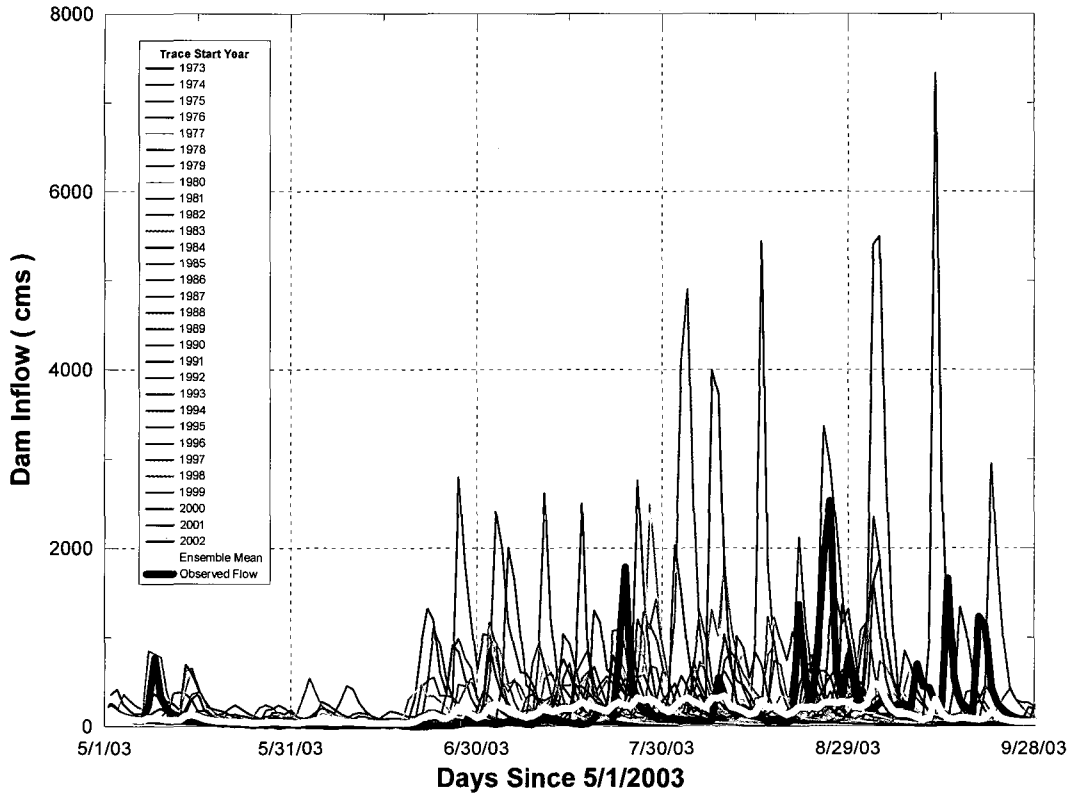


Fig. 6. ESP trace ensemble of Soyang River dam. Forecast for the period 1 May 2003 ~ 27 Sep. 2003. This is a conditional simulation based on the current conditions as of 1 May 2003. The yellow- and blue-solid line show ensemble mean and flow observation, respectively

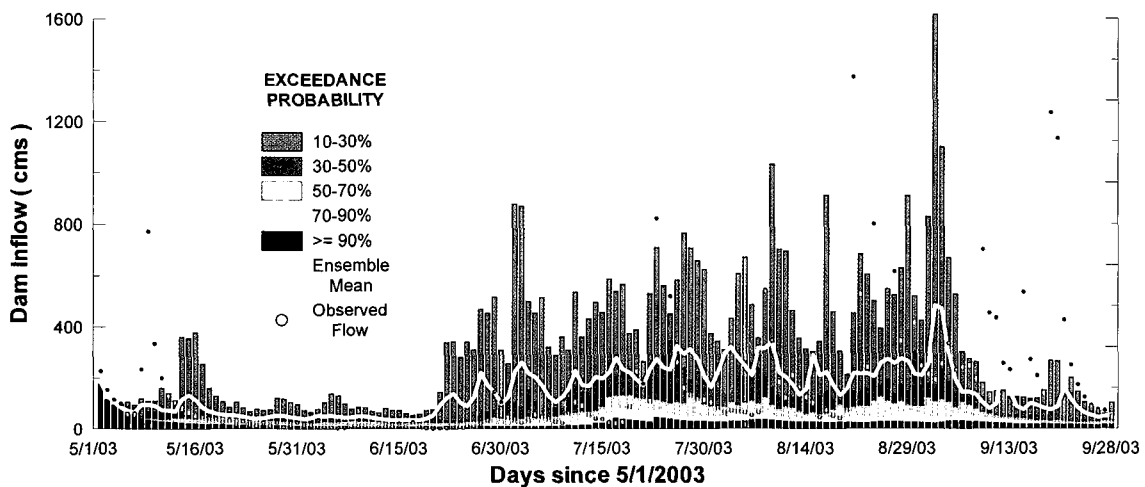


Fig. 7. Daily chances of exceeding reservoir inflow on the Soyang River. Forecast for the period 1 May 2003 ~ 27 Sep. 2003. The yellow-solid line shows ensemble mean and observed flow shown in dotted point

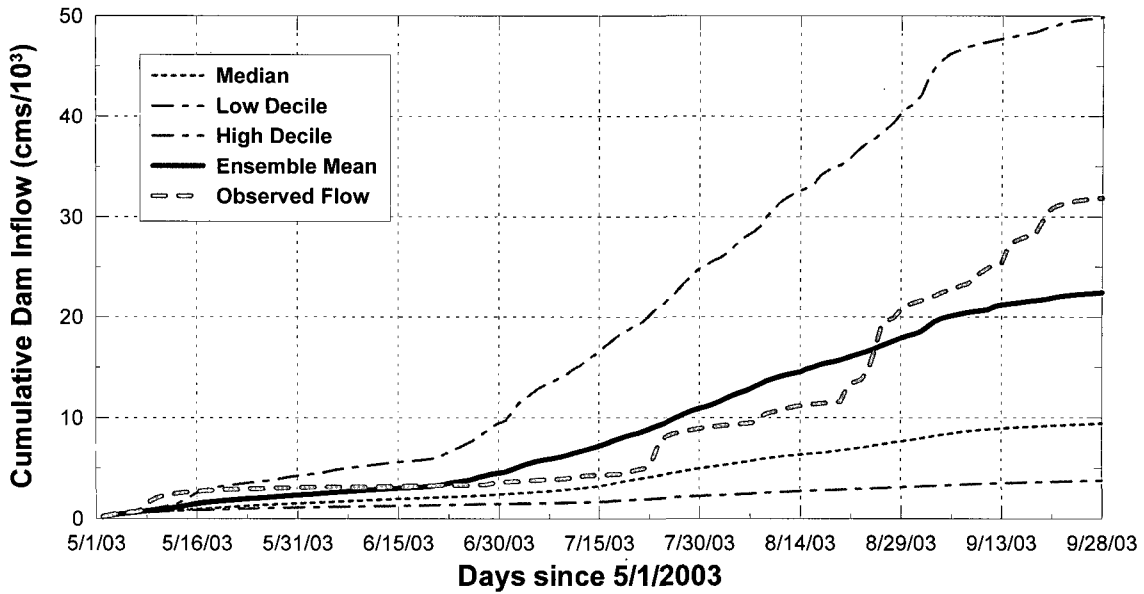


Fig. 8. Cumulative daily ESP results for uncertainty analysis

보다는 1주 혹은 2주단위의 예측시간을 가지도록 본 시스템을 구축하고자 하였다. 이를 위해서는 다음절에서와 같이 예측시간 간격에 대한 ESP 예측의 정확도 분석이 먼저 선행되어야 할 것이다.

3.1 ESP 확률예보를 위한 시간해상도 민감도 분석

중장기 댐 유입량 확률예보를 위한 적정 예측시간 간격을 추정하고자 시간해상도에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 이들 과정은 Fig. 6의 일단위 ESP 결과(2003년 5월 1일부터 150일 예측결과)로부터 5, 7, 10일 등과 같은 시간간격을 가지도록 댐 유입량값을 변환하여 동일 확률예보기법을 적용함으로써 각 시간해상도에 대한 계급구간별 초과확률을 계산한다. 이렇게 산정된 초과확률은 Eq. (5)의 RPS 및 다음 Eq. (7)과 같은 threat score로 그 정확도를 분석하여 적정 시간해상도를 선정하였다.

$$\text{threat score} = \frac{\text{hits}}{\text{hits} + \text{misses} + \text{false alarms}} \quad (7)$$

Eq. (7)의 threat score는 기상 수치예보 자료의 격자

체계에서 관측 격자자료와 비교하여 예보결과의 정확도를 분석할 때 자주 사용되는 기법으로 "hits"는 예보적중, "misses"는 예보누락, "false alarms"은 예보불중을 의미하는 것으로 예보누락 및 예보불중 격자가 많을수록 threat score 값은 감소하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 관측유량 자료를 바탕으로 예보누락 값을 제외한 threat score를 총 예측시간 동안 각 계급구간별로 계산하고 예보누락 자료를 파악하였다. Table 3은 이들 결과를 나타낸 것으로 예측시간 간격이 늘어날수록 누락된 예보자료가 현저히 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 예측시간 간격을 보다 세분화하여 RPS 예측 정확도 분석기법을 적용한 사례이다. 여기에서 사용된 RPS 값은 각 시간대의 RPS 값을 총 예측시간 동안 평균하여 나타낸 결과로써 7일까지는 감소하다가 그 이후로 약간 반등되는 경향을 보이거나 예측시간 간격의 해상도가 증가할수록 RPS 평균값이 전반적으로 감소함을 알 수 있다. RPS는 예측누가확률이 관측누가확률(0 또는 1)보다 멀리 떨어질 경우 예측오차가 증가하므로 일종의 거리 민감도의 의미를 내포하기 때문에 RPS 값이 작아질수록 예측오차가 감소하는 것으로 평가된다.

Table 3. Sensitivity results with threat score for the selection of ESP time resolution

Case	Threat Score					Σ	missing
	≥ 90%	70-90%	50-70%	30-50%	10-30%		
1 day	0.1867	0.0667	0.2000	0.1133	0.2067	0.7734	34
5 day	0.1667	0.1000	0.2333	0.1000	0.1000	0.7000	9
7 day	0.2381	0.1429	0.1429	0.0952	0.2381	0.8572	3
10 day	0.1333	0.1333	0.2000	0.1333	0.1333	0.7332	4
14 day	0.2000	0.0000	0.3000	0.1000	0.1000	0.7000	3

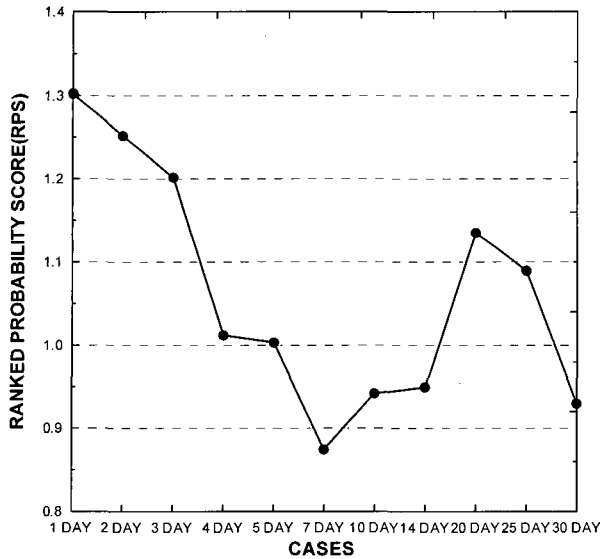


Fig. 9. Sensitivity results with RPS to select time resolution for ESP

Table 3 및 Fig. 9의 시간 해상도에 대한 민감도 분석결과 예측시간 간격이 증가할수록 ESP 예측결과의

불확실성(예, 예보누락 감소)이 감소하면서 그 정확도가 전반적으로 증가함을 살펴볼 수 있었다. 이러한 분석결과를 바탕으로 중장기 댐 유입량 확률예보를 위한 적정 예측시간 간격의 선택을 위해 NWS의 ESP 예보 산출물을 분석한 결과 장기 하천유출량 예보를 위해 2주 예보시간 간격으로 5개월 장기예보를 수행하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 중장기 ESP 확률예보에 초점을 맞추어 비교적 예측 정확도가 높은 1주 간격의 확률예보를 28일(4주) 예측시간(lead time) 동안 수행할 수 있도록 ESP 시스템을 구축하였다. 여기서, 예측시점 및 종점은 GDAPS 자료생산 시간과 일치하도록 매일 12UTC에 실시간 개념으로 28일 동안 연산을 수행한다. 일례로, Fig. 10은 Fig. 7의 유량 앙상블 결과로부터 1주 간격 확률예보 결과를 나타낸 것이고, Fig. 11은 앙상블 결과의 기대치(expected value)를 최대, 최소, 평균값 및 표준편차의 범위로 표현한 것으로 Fig. 10과 같은 확률예보에 대한 불확실성을 간접적으로 파악할 수 있다.

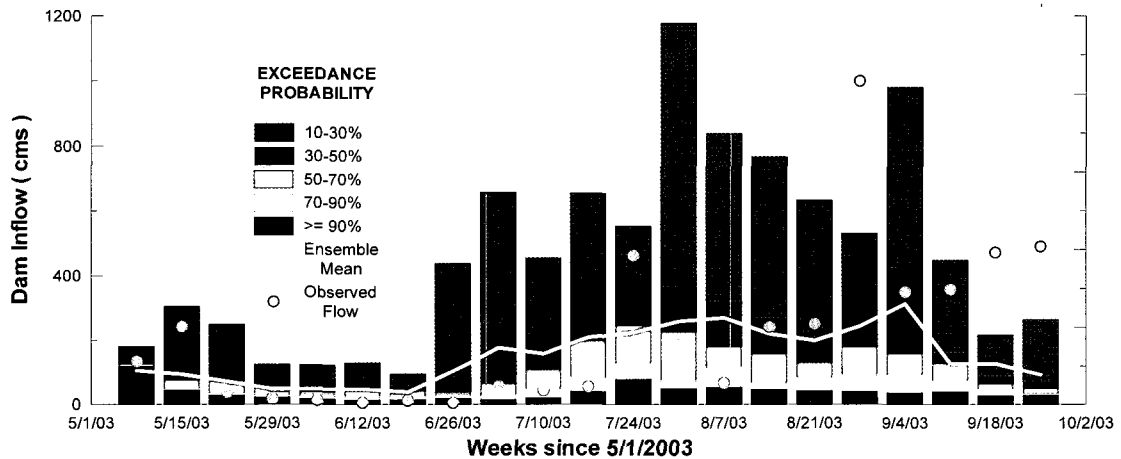


Fig. 10. Same as in Fig. 7 but for weekly exceedance probability forecast

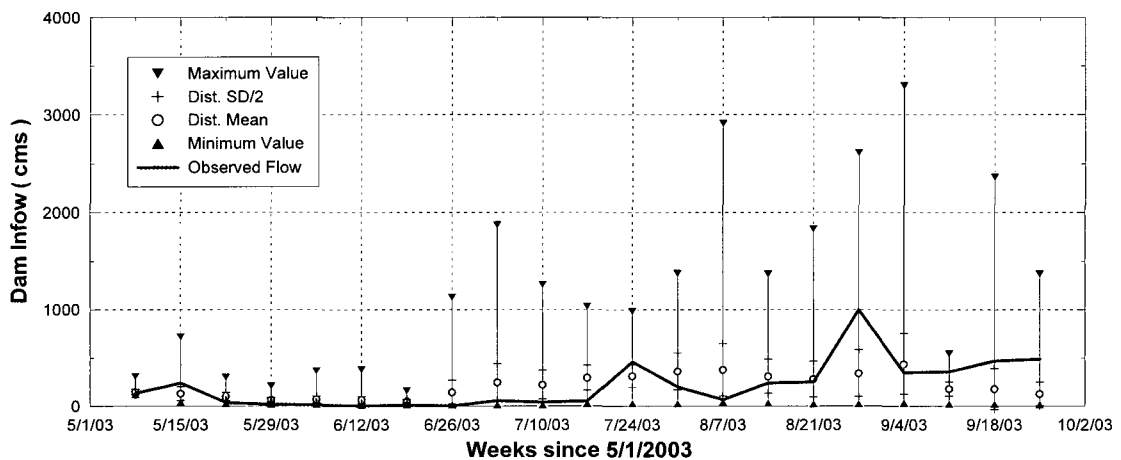


Fig. 11. ESP expected value of the Soyang River dam. The forecast time intervals are 1 week for the period 1 May 2003 ~ 27 Sep. 2003

3.2 GDAPS 수치예보 자료를 활용한 사례연구

본 절에서는 GDAPS T213 수치예보 자료를 활용한 ESP 댐 유입량 확률예측 결과를 기술하고자 한다. 국내 기상청 현업에서는 전지구 예보를 위해 GDAPS T213 자료는 공간해상도가 56×56km로 매일 12UTC에 12시간 간격의 10일 예측자료를 생산한다. 본 연구에서는 이러한 예측자료 중 강수량자료를 추출하여 일단위의 10일 예측자료로 변환하고 동일 기간동안의 과거 30년 강우 앙상블 입력자료로 상관계수를 계산하여 가중치가 부여된 강우 앙상블 자료를 생산한다. 10일 동안 계산된 상관계수로 추정된 가중치는 30일 과거 강우자료에 동일하게 적용되어 준분포형 TOPMODEL에 입력된다. Fig. 12 및 13은 소양강 댐지점에서 2003년 7월 21일부터 4주 동안 GDAPS 자료를 활용하여 ESP 확률예보의

적용사례를 표현한 것으로 동일 가중치가 부여된 기존 ESP 결과와 함께 나타내었다.

Fig. 12의 댐 유입량 예측결과에 따르면 가중치 부여 방법에 따른 결과에서 관측유량에 비록 동일 확률구간에 위치하지만 GDAPS 자료로 가중치가 부여된 ESP 결과에서 각 초과 확률구간 분포의 적절한 증가 및 감소로 인하여 관측유량과 비교하여 그 시간적 변동성이 비교적 안정적으로 예측됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 13의 ESP 기대치 분석에서 첫 1주 및 4주째의 예측결과가 불확실성을 의미하는 표준편차의 범위를 줄이면서 관측유량에 더욱 근접하는 것으로 나타나 ESP 시스템에서 GDAPS 자료의 활용가치가 높은 것으로 판단되었다. 이러한 GDAPS 활용사례의 보다 상세한 분석을 위해 2004년 7월(31일) 동안 일단위 실시간 개념으로 본 연구에서 구축된 ESP 시스템을 적용해 보았다.

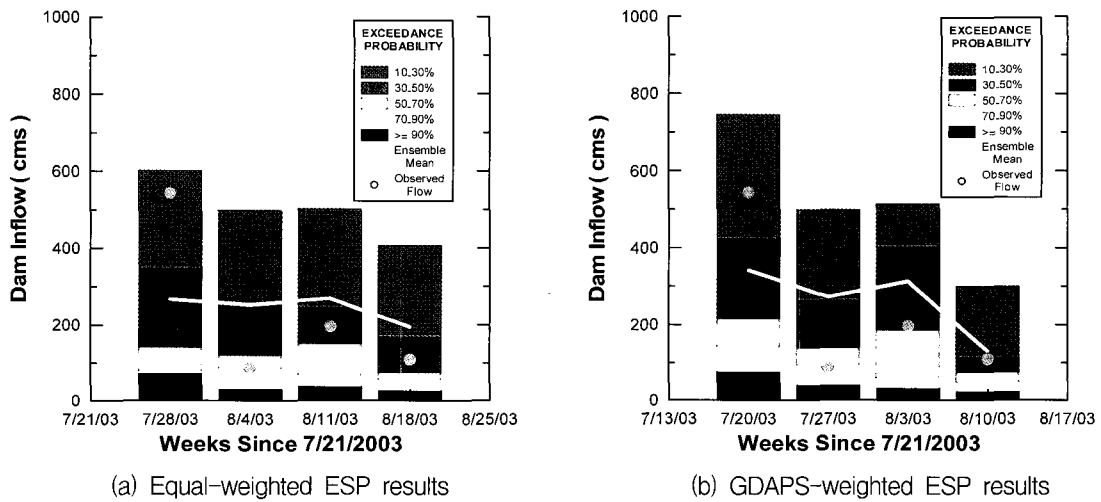


Fig. 12. Same as in Fig. 10 but for forecast period is 4 weeks since 21 July 2003 and a conditional simulations based on the current conditions as of 21 July 2003: (a) equal-weighted ESP results; (b) GDAPS-weighted ESP result

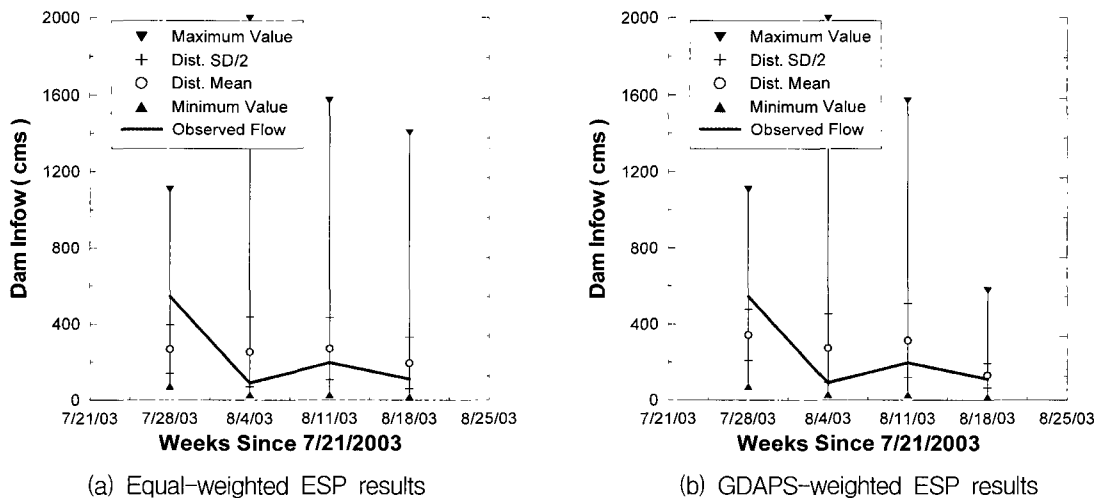


Fig. 13. Same as in Fig. 11 but for forecast period is 4 weeks since 21 July 2003 and a conditional simulations based on the current conditions as of 21 July 2003: (a) equal-weighted ESP results; (b) GDAPS-weighted ESP result

Fig. 14는 2004년 7월 동안 ESP 시스템의 적용결과 그 정확도를 일단위 RPSS 값으로 나타낸 것이다. 또한 GDAPS 자료로부터 산정된 가중치 부여 전의 기존 ESP 결과와 함께 표현하여 ESP 정확도 향상에 대한 비교분석을 수행하였다. 여기서 Eq. (3)의 가중치 계산을 위한 매개변수 α 의 민감도 분석을 수행하여 상관계수의 하한치(cc_L)는 -0.1, 상한치(cc_U)는 0.7로 결정되었다. 한편, RPSS는 2.5절에서 설명한 바와 같이 1과 같거나 작은 값을 가지면서, 양(positive)의 RPSS는 과거 관측 수문곡선 앙상블의 예측결과에 대한 향상률(%)를 의미하고 음(negative)의 RPSS는 이와 반대로 관측 수문곡선으로만 예측한 앙상블 결과가 보다 높은 신뢰도를 가진다는 의미이다. Fig. 14에서 알 수 있는 바와 같이 GDAPS 자료를 활용하여 가중치가 부여된 ESP 확률예보 결과의 정확도가 4주 예측기간 동안 비교적 향상된 결과로 나타났다. 특히 4주 예측결과에 대한 평균

적 측면에서 2~3일, 6~7일, 15~17일 및 23~26일 동안 가중치가 부여되지 않은 ESP 예측결과에 비해 약 5~30%정도의 향상률을 보인다. 각 주의 RPSS 평균값을 계산한 결과 상대적 정확도가 각각 4.5, 1.8, 0.8, 1.6% 향상된 것으로 나타났다.

Fig. 15 및 16은 2004년 7월 3일 및 16일의 확률예측 자료로써 가중치 부여로 인한 정확도 향상결과의 실례를 나타낸 것이다. 두 사례 모두 가중치가 주어진 ESP 확률예보 결과가 관측유량과 비교하여 그 시간적 변동성이 보다 안정적으로 형성됨을 알 수 있고, 특히 각 사례의 3주째 및 1주째 예측결과는 기존 ESP 결과가 예측하지 못한 확률구간의 범위를 넓혀 관측유량을 포함할 수 있는 예측 정확도의 향상을 가져왔다. 따라서 본 연구에서 개발된 ESP 시스템은 1주 단위의 한달예보를 수행하는 중장기적 측면에서 기존 ESP 결과보다 향상된 정확도로 댐 유입량을 예측할 수 있어 GDAPS 자료

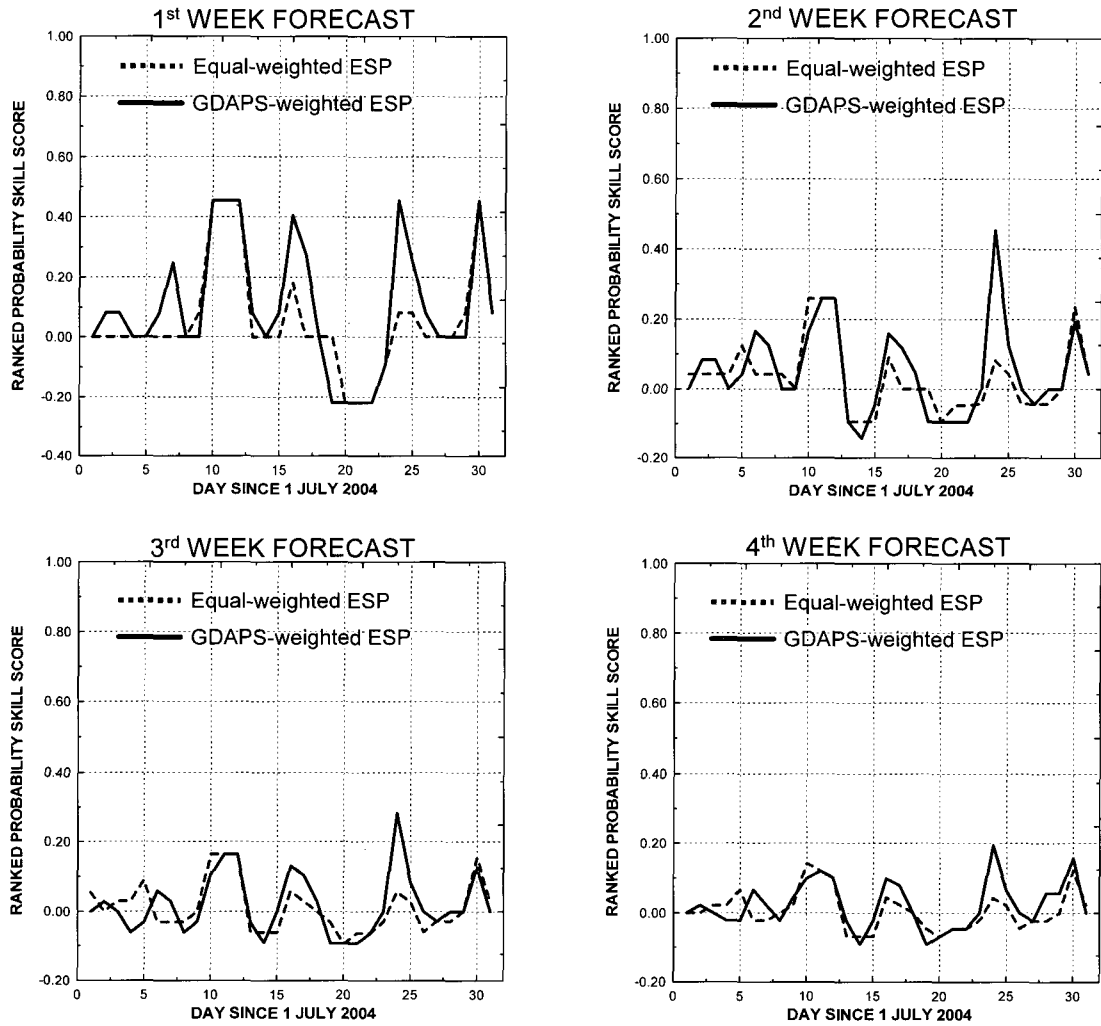
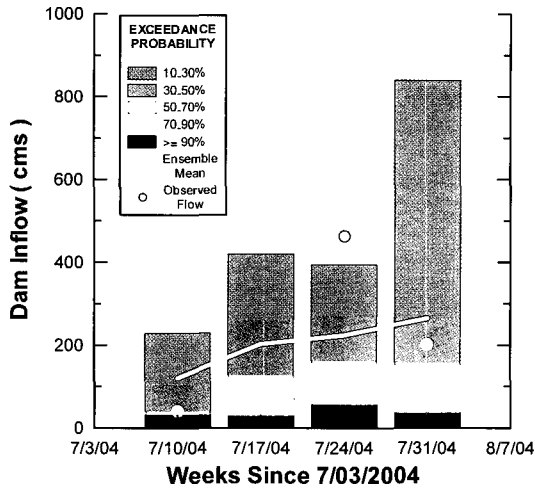
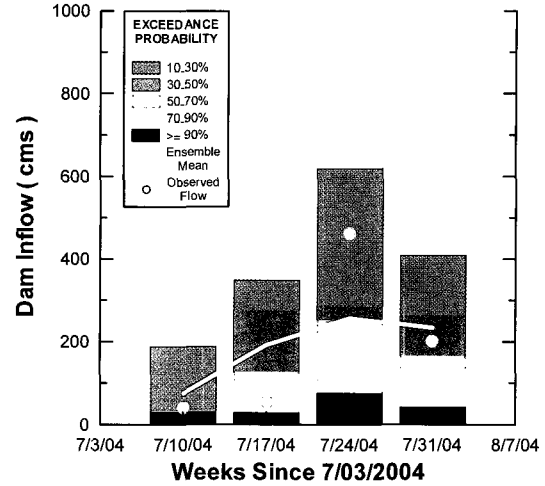


Fig. 14. Daily RPSS value for the traditional and GDAPS-weighted ESP results. The forecast period are 1 month since 1 July 2004. Upper and lower limited value of correlation coefficient are used(CCL=-0.1 and CCU=0.7)

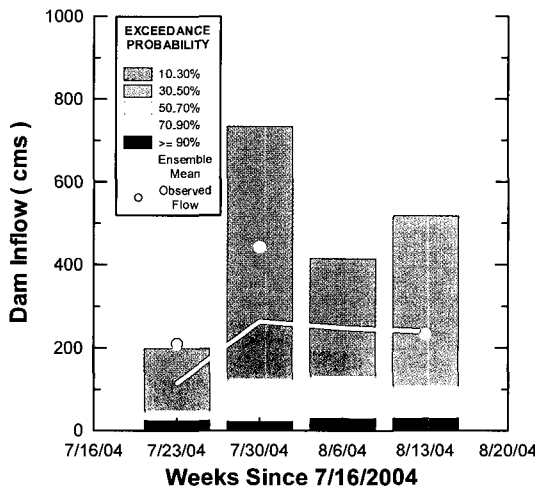


(a) Equal-weighted ESP results

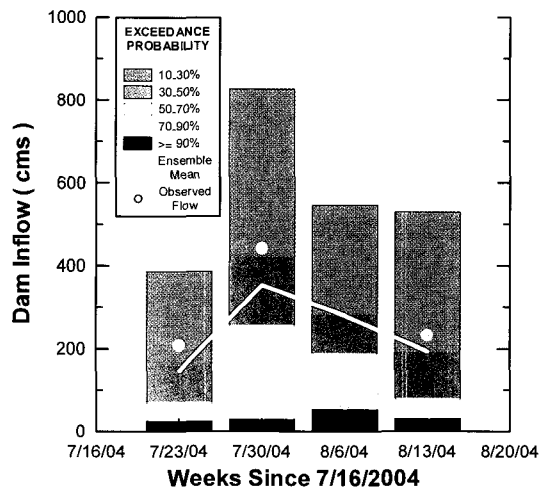


(b) GDAPS-weighted ESP results

Fig. 15. Same as in Fig. 12 but for the period since 3 July 2004



(a) Equal-weighted ESP results



(b) GDAPS-weighted ESP results

Fig. 16. Same as in Fig. 12 but for the period since 16 July 2004

활용의 유용성을 살펴보고, 개발된 시스템을 실시간 댐 유입량 예측에 적용한다면 불확실성이 다소 높은 중장기적 수자원 관리 차원에서 유용한 수단이 될 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 준분포형 TOPMODEL의 장기유출 모의결과 및 구축자료를 기반으로 ESP 기법을 활용하여 미래에 발생할 수 있는 댐 유입량의 중장기적 확률예측에 관한 연구를 수행하였다. 개발된 ESP 시스템은 국내 기상청에서 생산되고 있는 GDAPS(T213) 수치예보자료를 이용하여 재현 가능성이 높은 유출 앙상블에 가중치를 부여할 수 있도록 구축하였고, 확률론적 예보기법으로 초과 확률구간별 댐 유입량을 예측하고 RPSS 검증기법으로 ESP 예측결과의 정확도를 분석하였다.

개발된 ESP 시스템을 바탕으로 2003년 5월 1일을 기준으로 150일 동안 생산된 유량 앙상블을 평가한 결과 일단위 개념의 확률예보는 높은 불확실성을 내포할 수 있었고, 중장기 확률예보에 초점을 맞추어 예측시간 간격에 대한 ESP 정확도의 민감도를 분석한 결과 예측시간 간격의 해상도가 증가할수록 예측결과의 불확실성이 감소하면서 그 정확도가 전반적으로 증가함을 살펴볼 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 GDAPS 자료를 활용한 1주 단위의 한달예보를 수행한 ESP 결과는 각 초과 확률구간 분포의 적절한 증가 및 감소로 인하여 그 시간적 변동성이 비교적 안정적으로 예측되고 예측결과의 불확실성을 감소시킬 수 있어 그 활용가치가 높은 것으로 판단되었다. 특히, 2004년 7월(31일) 동안 일단위 실시간 개념의 적용사례에서는 4주 예측기간 동안 기존 ESP 예측결과에 비해 약 5~30%정도의 향상률을 보였

고, 각 주의 평균 RPSS를 계산한 결과 상대적 정확도가 각각 4.5, 1.8, 0.8, 1.6% 향상된 결과를 제시하였다.

따라서 본 연구에서 개발된 ESP 시스템은 1주 단위의 한달예보를 수행하는 중장기적 측면에서 기존 ESP 결과보다 향상된 정확도로 댐 유입량을 예측할 수 있어 GDAPS 자료 활용가치가 높은 것으로 사료된다. 향후, 개발 시스템의 정확도 향상을 위해 28일의 예측기간을 가지는 GDAPS T106(장기 수치모델)자료의 활용이 필요하며, 중장기 기상 수치모델 자료의 공간 해상도를 수문학적 유역 스케일로 높일 수 있는 downscaling 기법이 요구된다. 또한, 본 시스템의 활용성을 보다 높이기 위해서는 이수기 확률예보에 대한 평가가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

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

참고 문헌

- 건설교통부 (2003). **수계별 계절예측강우의 댐운영 적용방안 연구**. 한국수자원공사. p. 441.
- 김진훈, 윤원진, 배덕효 (2005). "단기 예측강우를 활용한 실시간 유량 예측기법의 적용.", **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제1호, pp. 11-23.
- 장기호, 김진훈, 배덕효, 권원태 (2002). "1998 호우사상에 대한 대기-유량 결합 모델 모의실험: IHP 평창강 유역." **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제38권, 제5호, pp. 509-522.
- 정대일 (2002). **양상불 예측을 이용한 총주댐의 월 유입량예측**, 석사학위논문, 서울대학교, 104 pp.
- 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.
- Bradley, A. A., Schwartz, S. S., and Hashino, T. (2004). "Distributions-Oriented Verification of Ensemble Streamflow Predictions." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 5, pp. 532-545.
- 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.
- Clark, M. P., and Hay, L. E. (2004). "Use of Medium-Range Numerical Weather Prediction Model Output to Produce Forecasts of Streamflow." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 5, pp. 15-32.
- Croley, T. E. (2000). *Using meteorology probability forecasts in operational hydrology*, ASCE press. 206 pp.
- Epstein, E. S. (1969). "A scoring system for probability forecast of ranked categories." *J. Appl. Meteor.*, Vol. 8, pp. 985-987.
- Hersbach, H. (2000). "Decomposition of the continuous ranked probability score for ensemble prediction systems." *Weather Forecasting*, Vol. 15, pp. 559-570.
- 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. Hydrometeorology*, Vol. 1, pp. 311-329.
- 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.
- Murphy, A. H. (1969). "On the ranked probability score." *J. Appl. Meteor.*, Vol. 5, pp. 988-989.
- Murphy, A. H. (1971). "A note on the ranked probability score" *J. Appl. Meteor.*, Vol. 10, pp. 155-156.
- 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.
- Werner, K., Brandon, D., Clark, M., and Gangopadhyay, S. (2005). "Incorporating Medium-Range Numerical Weather Model Output into the Ensemble Streamflow Prediction System of the National Weather Service." *Journal of Hydro-meteorology*, Vol. 6, pp. 101-114.

(논문번호:05-96/접수:2005.07.14/심사완료:2006.02.09)