

앙상블 기법을 이용한 안동댐 유입량 예측

강민석* · 유명수** · 이재응***

Kang, Min Suk*, Yu, Myungsu**, Yi, Jaeung***

Prediction of Andong Reservoir Inflow Using Ensemble Technique

ABSTRACT

In this study, Andong Reservoir monthly and ten days inflows from July 2011 to September 2011 are predicted using SWAT model and ensemble technique. The weight method using monthly and ten days rainfall forecasts from Korea Meteorological Administration is applied for accurate analysis. If the rainfall prediction announced by Korea Meteorological Administration is close to the actual rainfall, the PDF-Ratio Method shows the best result. If the past high rainfall occurrence is close to the actual rainfall, the modified PDF-Ratio method shows the best result. This method can improve the prediction accuracy even though the Korea Meteorological Administration forecast is not accurate. On the contrary, if Korea Meteorological Administration forecast is different from the actual rainfall and the past rainfall occurrence statistics of lower section, the uniform method shows the best result.

Key words : ESP, SWAT Model, PDF-Ratio, Andong reservoir

초록

본 연구에서는 앙상블유량예측기법과 SWAT 모형을 이용하여 안동댐의 2011년 7월~9월의 각 댐유입량 예측을 실행하였으며 월별 및 순별 분석을 수행하였다. 또한 정확한 분석을 위해 기상청의 월별 및 순별 강우예보자료를 이용한 가중값 부여방법을 사용하였다. 분석 결과 기상청에서 발표한 강우 예측 구간이 실제 강우 구간과 동일하면 PDF-Ratio 가중값 부여방법이 가장 높은 정확성을 보이며, 과거 강우발생 구간 통계 중 높은 구간이 실제 강우 구간과 동일하다면 수정 PDF-Ratio 가중값 부여방법이 가장 높은 정확성을 보였다. 이는 기상청 예측이 맞지 않은 경우에도 과거 강우발생 구간의 빈도에 따라 정확성을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 반대로 기상청의 예측이 실제와 다르면서 과거 강우발생 구간 통계에서도 낮은 구간의 강우가 발생하면 균일 가중값 부여방법의 정확성이 가장 높게 분석되었다.

검색어 : 앙상블 예측, SWAT모형, PDF-Ratio, 안동댐

1. 서론

수자원관리에서 유량예측은 수자원시스템 운영에 결정적인 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나이며, 효율적인 물배분이나 발전 등 이수활동을 위해서도 필요하다. 수문학적 예측에는 예측변수를 하나의 값으로 나타내는 확정론적 예측과 발생 분포를 나타내는 확률론적 예측이 있으며, 확정론적 예측은 단일 예측값을 제시함으로써 빠른 정책의 결정이 가능하기 때문에 수자원 운영 정보로 유용하게 활용될 수 있다. 그러나 확정론적 예측은 예측의 불확실성이 항상 존재하기 때문에 잘못된 예측정보를 기준으로 수자원운영이 이루어질 경우 인명과 재산피해를 유발할 가능성이 있다. 이에 반해 확률론적 예측은 수자원운영을 결정해야 하는 실무자와 일반인이

* 미래자원연구원 전임연구원 (kminsuk22@gmail.com)

** 정회원 · 아주대학교 건설교통공학과 박사수료 (niceguy-03@ajou.ac.kr)

*** 정회원 · 교신저자 · 아주대학교 건설시스템공학과 교수 (Corresponding Author · Ajou University · jeyi@ajou.ac.kr)

Received November 14, 2013/ revised January 3, 2014/ accepted April 26, 2014

받아들이기에 많은 시간과 연구가 필요하지만 예상확률을 제시함으로써 위험도를 고려한 수자원 관리가 가능하며 확정론적 예측보다 불확실성에 대해 효율적으로 대처할 수 있는 장점을 가지고 있다.

수문학적 예측 중 하나인 양상블 예측기법(ESP : Ensemble Streamflow Prediction)은 물리적 모형과 확률적 대표성을 갖는 미래의 재현 가능한 과거의 기상자료를 결합하여 이용하는 기법이다(Smith et al., 1992). 미국 기상청(NWS : National Weather Service)에서 양상블 예측기법을 개발한 이후로 정확도를 높이기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다. Faber (2000)는 양상블 예측에서 생성된 유량 양상블을 SSDP (Sampling Stochastic Dynamic Programming)에 접목하여 저수지 운영 최적화 문제에 적용한 바 있다. SSDP와 양상블 예측기법을 접목할 경우 유출의 다양성을 고려할 수 있다. Jung (2002)은 양상블 예측과 가중치 부여방법을 이용하여 충주댐의 월 유입량을 예측하여 충주댐 확률예보를 연구하였으며, 양상블 예측의 효용성을 입증하였다. Bradley et al. (2003)은 예측 분포의 다양성을 고려하여 Des Moines 강에 ESP를 적용하였으며, 분포 중심에서의 접근은 양상블 예측 시스템 평가에 용이하다고 연구하였다. Franz et al. (2003)은 콜로라도 지역의 기상예보 자료를 적용하여 14군데의 예측 지점을 설정하고 예측 지점의 양상블 유량예측을 제시하였다. 유량예측 결과 기후학적 예측보다 더 정확하게 미래의 하천 유량을 예측하고 평균 최대 7개월 까지 예측 가능하다는 결론을 내렸다. Olsson and Lindstorm (2008)은 스웨덴 45개의 저수지에 18개월 동안의 9일 유출량 양상블 예측을 평가하였으며, 기상예측자료를 이용할 경우 기상예측의 정확성이 수문모델의 정확성보다 유출량 예측에 더 많은 영향을 끼친다는 것을 연구하였다. Kang (2008)은 양상블 유량예측의 정확성을 높이기 위해 사전 및 사후처리에 관한 연구를 진행하고 분석하였으며, 사전처리를 통해 양상블 예측기법의 기상입력변수에 존재하는 불확실성을 감소시키고 사전 및 사후처리를 접목시키지 않는다면 보정되지 못한 오차 및 불확실성에 의해 예측기법이 저평가 될

수 있음을 확인하였다. Ahn et al. (2011)은 기상예보를 고려하여 금강 유역에 양상블 유량예측기법을 적용하고 정확성을 평가하였으며, 기상청의 기상예보를 고려할 경우 예측 정확도가 더 우수하다는 결론을 내렸다. 그러나 임의로 변환한 기상전망을 사용하였기 때문에 실제 기상전망이 포함하는 불확실성이 배제되었으며 추후 기상청에서 제공하는 기상전망의 불확실성에 대해 지속적인 추가 연구의 필요성을 제시하였다.

앞선 연구에서 양상블 예측 정확성을 높이고자 많은 방법을 사용했으며 그중 하나는 기상예보를 활용하여 가중값을 부여하는 방법이다. 그러나 기상예보 자료의 신뢰도에 따라 정확성은 많은 차이를 나타내므로, 기상예보자료를 이용하여 가중값을 부여하는 동시에 기상예보자료와 과거의 실제 기상자료 빈도분석을 함께 활용한 가중값 부여방법이 필요하다. 또한 양상블 예측과정에 필요한 강우-유출 모형은 많은 시나리오를 적용하고자 대체적으로 변수가 많지 않은 Tank 모형과 같은 간단한 모형을 많이 사용하였으나 유량 양상블의 정확성을 높이기 위해서는 다양한 기상변수와 토양의 상태를 반영할 수 있는 보다 정밀하고 정확한 모형을 사용하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 중장기 강우-유출 모형인 SWAT 모형과 양상블 예측기법을 이용하여 안동댐의 월별 및 순별 유입량을 예측하고 그 정확성을 평가하였다. 또한 양상블 예측기법에서 모든 시나리오에 동일한 가중치를 두는 균일 가중값 부여방법, 기상확률예보를 이용한 PDF-Ratio 가중값 부여방법 및 기상확률과 과거 빈도확률을 이용한 수정 PDF-Ratio 가중값 부여방법을 이용하여 정확도를 비교하고 분석하였다.

2. 기본 이론

2.1 양상블 예측기법

어떤 함수가 시간에 대해 한 값으로 정해지는 함수를 확정적 함수라 하며, 그 값이 통계적으로 주어지는 함수를 통계적 함수라고

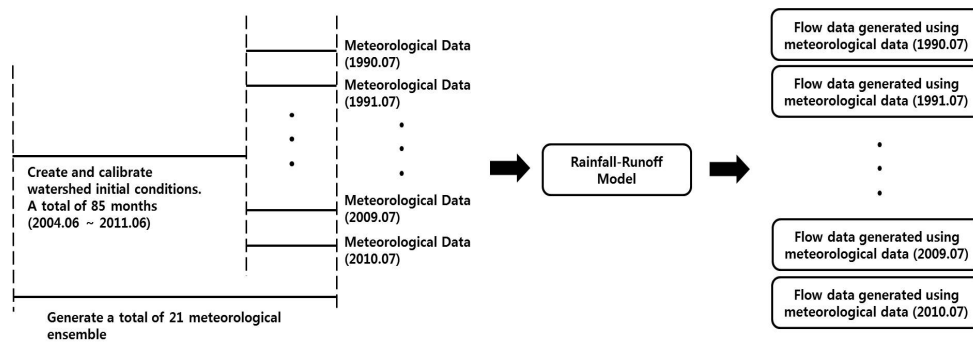


Fig. 1. Ensemble Generation Processes

한다. 통계적 함수에서 일정 시간 동안 관측한 자료를 표본이라 하며, 표본의 집합을 앙상블이라고 한다(Jung, 2002). 관측자료에 의존하는 수문학적 측면에서 살펴보면 강우, 기온 및 습도 등 기상자료와 댐유입량 및 유출량 등의 자료를 앙상블로 생성할 수 있다. 앙상블 예측은 예측시점에서 유역의 상태와 미래 재현 가능한 과거 기상자료를 결합한 확률론적 예측이다. 즉, 강우-유출모형에 미래에 일어날 가능성이 있는 기상 앙상블을 이용하여 다수의 유량 앙상블을 생성하고, 생성된 유량 앙상블의 통계 및 확률분석을 통하여 유량예측이나 홍수예측을 하는 등 수문학적으로 이용하는 방법이다. Fig. 1은 앙상블 예측 과정을 위한 유량 시나리오 생성 과정을 그림으로 나타낸 것이다. 2011년 7월에 대한 예측을 수행하기 위해 2004년 6월부터 2011년 6월까지 총 84개월의 자료를 이용하여 강우-유출 모형의 유역조기조건을 생성, 보정하고 2011년 7월 기상자료 위치에 1990년부터 2010년까지 각 7월의 과거 기상 시나리오로 이루어진 기상 앙상블을 입력하여 21개의 유량 시나리오로 이루어진 유량 앙상블을 생성하는 예이다.

2.2 가중값 적용

2.2.1 기상확률예보

기상예측정보를 이용하여 앙상블에 가중값을 부여하는 연구를 수행하기 위해서는 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 실시하고 있는 기상확률예보 형식인 Most-Probable Event 예보가 필요하다. Most-Probable Event는 과거 강우의 누가확률 33.3%와 66.7%를 기준으로 예측을 실시한다. 예를 들어 다음 달 예측 강우는 과거강우의 누가확률 33.3% 강우보다 작거나 같은 강우가 발생할 확률이 15%, 누가확률 66.7%를 초과하는 강우가 발생할 확률이 20%, 누가확률 33.3~66.7% 사이에 발생할 확률은 65%라고 예보를 하는 방법이다.

현재 우리나라 기상청에서는 이와 같은 확률예보는 이루어지지 않지만 장기예보로 한 달과 순별 예보를 하고 있으며, 그 방식은 과거기상자료의 평균값을 기준으로 평년보다 적겠음, 비슷하겠음, 많겠음으로 이루어지고 있다. 본 연구에서는 가중값을 산정하기 위해 확률 형태로 예보되는 강우예보가 존재해야 하며, 따라서 우리나라 기상청 예보를 인용하고 구간별 확률은 가정하여 이용하였다.

2.2.2 균일 가중값 부여

앙상블 예측은 미래 재현 가능성이 높은 과거 시나리오에 가중치를 두어 예측을 보다 정확하게 실행할 수 있다. 기본적인 예측은 모든 기상 시나리오가 동일한 가중치를 가지고 있다고 가정하는 균일 가중값 부여방법이다. n 개의 시나리오가 있다면 모든 기상 시나리오는 $1/n$ 의 확률로 재현 가능하다고 평가하는 것이다.

2.2.3 PDF-Ratio 가중값 부여

PDF-Ratio 가중값 부여방법은 기상 입력 자료의 확률분포를 이용하여 가중값을 구하는 방법으로 Stedinger and Kim (2010)이 다음과 같이 제안하였다. 기온, 강우 등 i 개의 과거기상 시나리오(v_i)와 수문학적 정보(h), 과거기상 시나리오의 분포($f(v)$)를 이용하여 과거자료를 보유한 기상 시나리오의 조건부 확률분포는 $f(v|h)$ 로 나타낼 수 있다. 평균 기온, 강우 기온 등 분포를 알 수 있는 기상변수 $g(v)$ 와 PDF-Ratio 방법을 이용하여 $g(v)$ 조건부 확률분포 $f(g(v)|h)$ 를 추정할 수 있고 이를 이용하여 기상 시나리오와 이에 해당하는 가중값(w_i)을 과거기상 시나리오(v_i)에 부여할 수 있다. 정규분포를 따르는 기상변수를 x 에 대한 확률밀도함수를 $f_0(x)$ 라하고 수문학적 정보에 따른 조건부 예측확률밀도함수를 $f_1(x) = f(x|h)$ 라 하면 가중값은 다음과 같이 정리할 수 있다. 먼저 x 의 다양한 함수로 표현되는 $g(x)$ 의 기댓값은 Eq. (1)과 같이 표현된다.

$$E(g(x)) = \int g(x)f_0(x)dx \quad (1)$$

여기서 수문학적 정보(h)가 주어진다면 기댓값은 Eq. (2)로 다시 표현할 수 있다.

$$E(g(x)) = \int g(x)f_1(x)dx = \int g(x)(f_1(x)/f_0(x))f_0(x)dx \quad (2)$$

따라서 각 시나리오의 가중값 w_i 는 Eq. (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$w_i = f_1(x_i) / f_0(x_i) \quad (3)$$

앙상블 기법에 이용하는 강우자료는 평년보다 많음, 비슷함, 적음 3개의 구간으로 나누어 이에 해당하는 발생확률을 이용하였다. 과거자료는 예측자료의 기준이 되고 예측기법이 존재하지 않는다면 미래의 강우는 과거자료에 의존하여 각 구간별로 동일한 확률을 가지기 때문에 누가확률 33.3%와 66.7%에 해당하는 강우를 기준으로 구간별 확률이 동일한 33.3%의 확률로 산정이 된다.

과거강우의 분포 $f_0(x)$ 와 강우확률예보 분포 $f_1(x)$ 가 동일하고 평균과 분산만 변한다면 예보자료를 이용하여 $f_1(x)$ 를 추정할 수 있다. $f_0(x)$ 의 누가확률 33.3%와 66.7%에 해당하는 강우 $r_{33.3}$ 과 $r_{66.7}$ 을 산정한 후 $f_1(x)$ 에서 $f_0(x)$ 에서 산정한 $r_{33.3}$ 과 $r_{66.7}$ 에 해당하는 누가확률 $Pr_{33.3}$ 과 $Pr_{66.7}$ 을 설정한다. 설정한 확률과 산정한 $r_{33.3}$ 과 $r_{66.7}$ 을 Eqs. (4a)~(4b)의 연립으로 $f_1(x)$ 의 평균 μ_1 과 표준편차 σ_1 를 산정할 수 있다.

$$\mu_1 + \sigma_1 \times \Phi^{-1}(\text{Pr}_{33.3}) = r_{33.3} \quad (4a)$$

$$\mu_1 + \sigma_1 \times \Phi^{-1}(\text{Pr}_{66.7}) = r_{66.7} \quad (4b)$$

여기서 Φ 는 표준정규 누적분포함수로 누기확률 p 에 대한 근사식 Φ^{-1} 은 Eq. (5)와 같다(Stedinger et al., 1992).

$$\Phi^{-1}(p) = \frac{p^{0.135} - (1-p)^{0.135}}{0.1975} \quad (5)$$

2.2.4 수정 PDF-Ratio 가중값 부여

PDF-Ratio의 예측확률밀도함수 $f_1(x)$ 과 달리 수정 PDF-Ratio는 예측확률밀도함수 $f_2(x)$ 를 생성할 때 기상청 예보자료뿐만 아니라 과거 강우 발생 구간 빈도를 함께 고려하여 가중값을 산정한다. 기상청에서 예보한 확률과 과거 강우 발생 빈도확률을 산술 평균하여 예측확률밀도 함수의 구간별 확률을 산정하는 것이다.

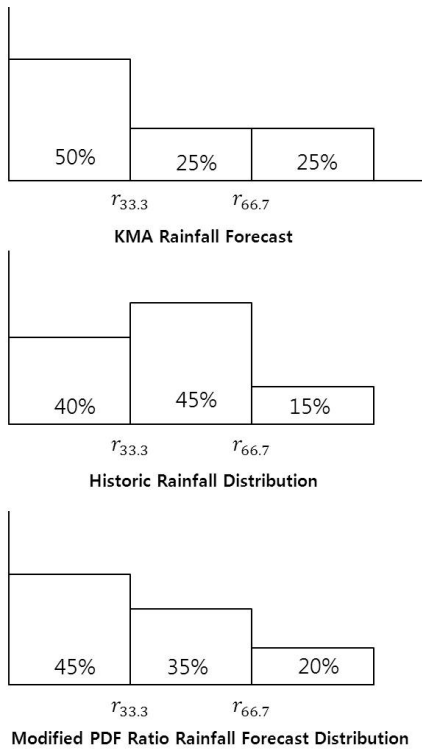


Fig. 2. Modified PDF-Ratio Calculation

Fig. 2와 같이 기상시나리오를 생성하기 위해 설정한 기간의 과거 강우 자료 중 $r_{33.3}$ 보다 강우가 적게 왔던 경우가 40%이며, 기상청 강우 예보확률이 50%라면 Eq. (4a)의 $\text{Pr}_{33.3}$ 은 45%로 설정하는 것이다. 이는 강우예보확률 정확성이 낮을 경우 과거에 재현되었던 강우와 함께 고려하여 정확도를 향상시키고자 하는 것이다. 구간별 예측확률 설정이 완료되면 PDF-Ratio와 동일한 과정인 Eq. (3)부터 Eq. (5)까지 과정을 이용하여 가중값을 산정한다.

2.3 예측정확성 평가

2.3.1 예측점수

양상블 예측은 확률론적 예측으로써 예보방안 및 예측정확성 평가는 통계분석을 통해 실시한다. 댐유입량확률예보는 댐유입량 발생구간을 설정하여 이에 해당하는 발생확률을 예보하는 것이다. 본 연구에서는 발생 가능한 댐유입량을 3개의 구간으로 분할하고자 하였으며 이러한 구간을 나누는 기준은 제시되어 있지 못한 실정으로 과거자료에 근거하여 결정하였다. 먼저 과거자료의 적합분포를 선정한 후 적합분포에 따른 누기확률 33.3%와 66.7%에 해당하는 댐유입량 $q_{33.3}$ 과 $q_{66.7}$ 을 산정한다. $q_{33.3}$ 과 $q_{66.7}$ 을 기준으로 $q_{33.3}$ 보다 작은 구간을 평년보다 작음, $q_{33.3} \sim q_{66.7}$ 에 해당하는 구간을 평년과 비슷함, $q_{66.7}$ 보다 큰 구간을 평년보다 큼으로 설정하였다. 따라서 과거 댐유입량 자료의 확률분포에서는 각 구간이 동일한 발생확률인 33.3%의 확률을 가지게 된다. 그다음 예측댐유입량 양상블에서 적합분포를 산정한 후 과거 댐유입량 확률분포에서

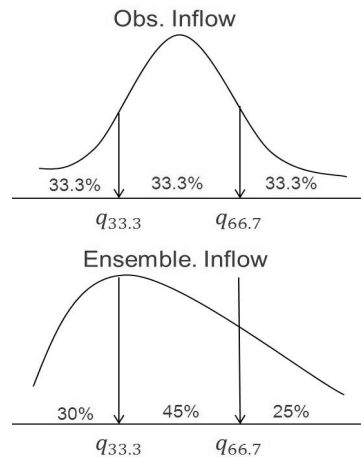


Fig. 3. Ensemble Estimation

Table 1. Probability of Prediction Interval

	Low	Medium	High
Interval	$q < q_{33.3}$	$q_{33.3} < q < q_{66.7}$	$q_{66.7} < q$
Probability	$P_{low} = \text{Pr}[Q \leq q_{33.3}]$	$P_{medium} = \text{Pr}[Q < q_{66.7}] - \text{Pr}[Q \leq q_{33.3}]$	$P_{high} = 1 - \text{Pr}[Q \leq q_{66.7}]$

산정한 $q_{33.3}$ 과 $q_{66.7}$ 에 해당하는 확률을 산정한다. 다음 Table 1은 예측구간을 산정하는 식을 나타낸 것이다.

예측하고자 하는 기간에서 실제 댐유입량 해당 구간 확률이 정확도가 되며, Fig. 3의 경우 예측 댐유입량이 평년보다 작음, 비슷함, 큼 순서대로 각각 30%, 45%, 25%의 예측확률로 산정되고 실제 댐유입량이 평년과 비슷한 구간으로 관측되었다면 정확도는 45%가 되는 것을 나타낸 것이다.

2.3.2 Ranked Probability Score

Ranked Probability Score (RPS)는 구간별 관측 값과 예측 값의 확률분포 차이를 이용하여 평가하는 방법이다. 확률분포를 일정한 구간으로 나눈 경우 관측 값과 예측 값이 일치한 구간만 평가하는 것이 아니라 관측 값과 예측 값이 일치하지 않은 구간의 확률분포를 함께 평가하기 때문에 확률론적 예보를 평가하는데 효율적이다. RPS는 완벽예보에서는 0의 값을 가지며, 정확성이 낮아질 경우 점차적으로 큰 양의 값을 가진다(Wilks, 1995). 예측점수에서는 예보와 실측이 일치한 경우의 확률을 점수로 제시하는 방법이지만 RPS는 일치하지 않은 경우의 확률까지 고려하는 것이 차이점이며, 확정론적 예측의 평가에 사용되는 Brier Score의 개념과 유사하다. RPS는 예측 구간이 3개 이상인 확률 예측에서 사용되며, 각 구간에서 발생한 확률들을 더해가는 누가확률개념으로 실측이 발생한 구간의 확률과 비교하여 계산하게 된다. 예측 확률은 저수, 중수 및 풍수 확률을 차례로 누가하여 산정해나가고 실측값은 실측이 발생한 구간을 1로 발생하지 않은 구간을 0으로 설정하여 산정한다.

$$Y_n = \sum_{i=1}^n y_i, \quad n = 1, \dots, I \quad (6a)$$

$$O_n = \sum_{i=1}^n o_i, \quad n = 1, \dots, I \quad (6b)$$

$$RPS = \sum_{n=1}^I [(\sum_{i=1}^n y_i) - (\sum_{i=1}^n o_i)]^2 = \sum_{n=1}^I (Y_n - O_n)^2 \quad (6c)$$

여기서, Y_n 는 예측의 누가확률, O_n 는 실측의 누가확률이며, I 는 예보구간의 수이다.

3. 시험유역 적용

3.1 시험유역 선정

양상불 예측기법을 이용하여 댐의 유입량을 예측하기 위해 상류에 댐 및 보로 인한 유량변화의 영향이 없으며 유역내 기상관측소가

다수 존재하는 안동댐을 선정하고 안동댐의 월별 및 순별 유입량의 예측을 평가하였다. 안동댐 유역은 낙동강 수계로 면적은 1,628.68 km^2 이며, 유역출구로부터 본류하천의 최원점인 유로연장 및 유역출구로부터 유역의 최원점인 최원 유로연장은 170.12km, 171.04 km이다. 단위유역은 12개로 이루어져 있다. 안동댐의 저수지 계획 홍수위는 EL. 161.7m, 상시만수위는 EL. 160.0m, 저수위는 EL. 130.0m이고 총 저수용량은 1,248백만 m^3 , 유효저수용량은 1,000백만 m^3 , 연평균 유입량은 27 m^3 /sec이다.

3.2 강우유출모형 선정

양상불기법을 이용하여 댐유입량을 예측하기 위해서는 우선 강우양상불을 강우-유출 모형에 입력하여 유량양상불을 생성해야 한다. 본 연구에서는 토양 상태와 강우 등의 기상조건의 반영이 용이한 중장기 강우-유출모형인 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하였다. SWAT 모형은 연속모형으로써 일 단위의 모의가 가능한 유역 단위의 강우-유출모형이다. SWAT 모형에서 지표면 유출량은 SCS 방법을 기반으로 하며 지하수는 두 개의 대수층과 유역 외 하천에 대한 회귀수에 기여하는 깊은 피압 대수층으로 나누어 계산한다. SWAT 모형은 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 만든 수문반응단위(Hydrologic Response Unit : HRU)로 유출량을 계산하여 설정한 유역의 출구점으로 유량을 계산해 나간다.

안동댐유역을 대상으로 SWAT 모형으로 구축하였다. 안동댐 지점을 유역 출구점으로 적용하기 위하여 모형 분석과정에 해당하는 유역분할을 실제 안동댐의 표준유역과 유사하게 분할하고 총 12개로 분할된 유역 중 안동댐 지점을 유출구로 하는 Fig. 4와 같이 11개 유역에 대한 결과 값을 산정하였다. SWAT 모형에



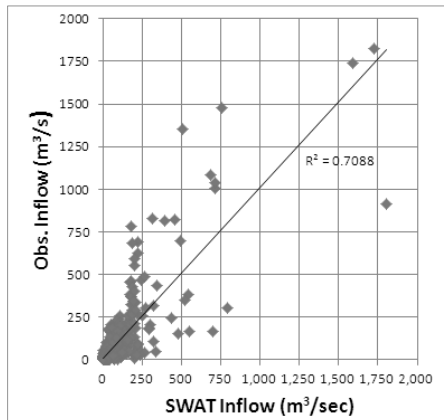
Fig. 4. Andong Dam Watershed of SWAT Model

입력되는 기상 자료로는 일단위의 강우, 최저 및 최고기온, 습도, 풍속, 일사량이 있으며 지형자료로는 토지피복도와 토양도가 있다. 안동댐 유역에 적용 시 강우는 10개 관측소 자료를 사용하였고 기온, 습도 및 풍속은 4개 관측소, 일사량은 3개의 관측소 자료를 사용하였다. 매개변수는 민감도 분석과 시행착오법을 거쳐 추정하였으며 조정된 매개변수와 그 값은 Table 2와 같다.

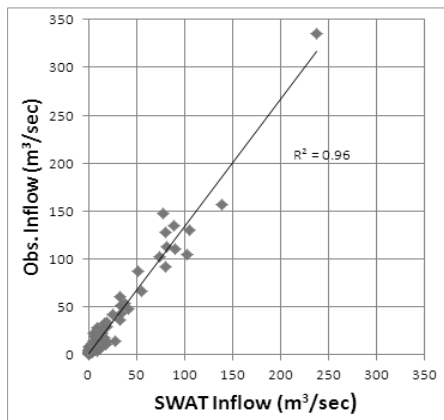
유량 앙상블 생성에 앞서 선행 모의기간을 제외한 2004년 1월부터 2011년 6월까지의 자료를 이용하여 SWAT모형의 적합성 검토

Table 2. Adjust Parameter of SWAT

Parameter	Value
Alpah_Bf	0.2
Gw_Delay	46
Gwqmn	2500
Canmx	4.5
Esco	0.2
CH_N2	0.04, 0.06, 0.07



(a) Daily Inflow



(b) Monthly Inflow

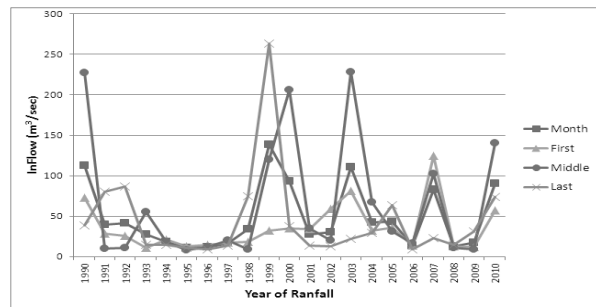
Fig. 5. Coefficient of Determination for SWAT and Oserved Data

를 실시하였다. 그 결과 댐의 일 유입량의 결정계수는 약 0.71, 월 유입량의 결정계수는 약 0.96으로 높은 상관성을 나타냈으며 (Fig. 5) 관측 일평균 유입량은 $30.64m^3/sec$, 모의 일평균 유입량은 $22.36m^3/sec$, 일평균 상대오차는 27%가 산정되었다. 또한, 일 유입량의 RMSE는 약 $55m^3/sec$, 월 유입량의 RMSE는 약 $17m^3/sec$ 로 산정되었다.

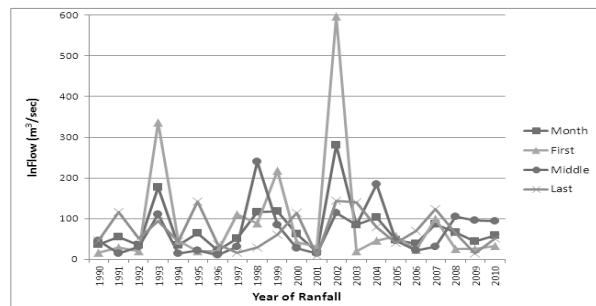
4. 적용 결과 및 분석

4.1 유입량 앙상블 생성

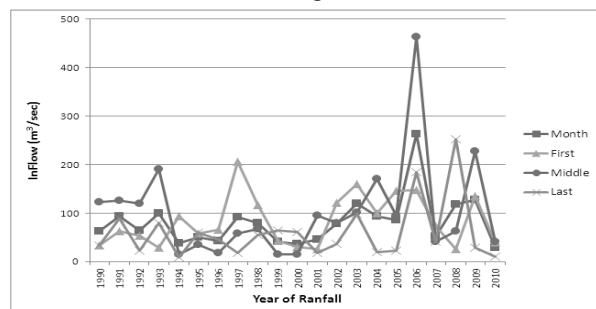
2011년 7월부터 9월까지 월별 및 순별 예측을 위한 유량 앙상블 생성을 위해 2000년 8월부터 예측월 전까지를 모형초기화 및 토양 상태 반영기간으로 설정하고 1990년부터 2010년까지 20년 동안의 강우 앙상블을 SWAT 모형에 입력함으로써 7월부터 9월까지 각



(a) July



(b) August



(c) September

Fig. 6. Ensemble of Inflow

월별 21개의 댐유입량 앙상블을 생성하였다. 즉 예측월 이전은 실측자료를 사용하고 예측 월에는 1990년부터 2010년의 21개의 강우자료를 입력하였다. 2011년 7월부터 9월까지 예측 월별, 상순, 중순, 하순의 댐유입량은 Figs. 6(a)~6(c)와 같다.

4.2 예측구간 설정

예측정확도를 평가하기 위해 먼저 과거 댐유입량 분포로부터 $q_{33.3}$ 과 $q_{66.7}$ 을 산정하여 평년보다 적음, 비슷함, 많음의 구간 경계를 설정하였다. 댐유입량 앙상블을 생성기간인 1990년부터 2010년까지의 실제 댐유입량의 적합분포를 산정한 후 $q_{33.3}$ 과 $q_{66.7}$ 을 구하였다. 적합분포는 Chi-Square 검정을 통해 대수정규분포(Log-normal Distribution)로 선정하였다. 2011년 7월부터 9월까지 예측 월별, 상순, 중순, 하순의 $q_{33.3}$ 과 $q_{66.7}$ 은 다음 Table 3과 같다.

4.3 가중값 적용

4.3.1. PDF-Ratio 가중값

PDF-Ratio 가중값 산정은 강우예보자료가 필요하기 때문에 기상청의 강우예보 자료 중 안동댐 유역에 해당하는 대구·경북

지역의 예보자료를 활용하였으며 강우예보는 평년보다 적음, 비슷함, 많음으로 실시되고 있다. PDF-Ratio 가중값 적용을 위해서는 강우예보의 정확성을 분석해야 하지만 대구·경북 지역의 강우예보를 실시한 기간이 짧아 정확성을 판별하는데 어려움이 있기 때문에 해당하는 예보 구간에 대해 정확도를 50%, 60% 및 70%로 가정하여 $f_1(x)$ 의 구간별 확률을 설정하였다. 강우는 10개 관측소의 강우 관측 값을 Thissen 면적 가중치를 사용하여 평균강우량으로 환산하였다. 월강우량 예측 값이 평년보다 많을 경우 50%의 정확도로 가정하면 평년보다 많을 확률은 50%가 되고 비슷함 및 적음은 각각 25%의 확률로 설정하게 된다. 구간 확률을 설정한 후 Eqs. (3)~(5)의 과정을 거쳐 $f_1(x)$ 의 평균(μ_1)과 표준편차(σ_1)를 산정하였다. Table 4는 대구·경북 지역의 2011년 7월부터 8월까지의 월, 상순, 중순, 하순의 강우예보이며 Table 5는 과거 월, 상순, 중순, 하순의 강우분포 $f_0(x)$ 와 확률분포 $f_1(x)$ 의 평균(μ)과 표준편차(σ)이다.

Table 3. Calculated $q_{33.3}$ and $q_{66.7}$

	July			
	Month	First	Middle	Last
$q_{33.3}$ (CMS)	46.44	31.95	31.22	40.14
$q_{66.7}$ (CMS)	80.75	74.35	68.22	77.15
	August			
	Month	First	Middle	Last
$q_{33.3}$ (CMS)	45.62	26.08	26.74	41.96
$q_{66.7}$ (CMS)	91.52	74.95	72.87	89.55
	September			
	Month	First	Middle	Last
$q_{33.3}$ (CMS)	23.62	22.16	18.37	16.33
$q_{66.7}$ (CMS)	62.41	54.22	62.14	43.11

Table 4. Forecast Precipitation

	July			
	Month	First	Middle	Last
Forecast	High	Medium	Medium	High
	August			
	Month	First	Middle	Last
Forecast	Medium	Medium	Low	High
	September			
	Month	First	Middle	Last
Forecast	High	High	Medium	High

Table 5. Calculated Average and Standard Deviation

Period	Variable	Native	PDF 50%	PDF 60%	PDF 60%		
July	Month	Mean(μ)	252.16	307.47	354.95	420.25	
		Std(σ)	128.14	164.85	188.44	216.05	
	First	Mean(μ)	81.64	81.64	81.64	81.64	
		Std(σ)	57.68	37.16	29.64	24.17	
	Middle	Mean(μ)	104.52	104.52	104.52	104.52	
		Std(σ)	85.43	55.04	43.9	35.8	
	Last	Mean(μ)	66.01	88.5	107.55	134.36	
		Std(σ)	52.11	67.13	76.24	88.2	
	August	Month	Mean(μ)	244.16	244.16	244.16	244.16
			Std(σ)	138.84	89.45	71.35	58.18
		First	Mean(μ)	87.86	87.86	87.86	87.86
			Std(σ)	111.34	71.72	57.21	46.66
Middle		Mean(μ)	73.15	47.54	25.84	4.68	
		Std(σ)	59.33	76.48	86.81	100.43	
Last		Mean(μ)	83.15	106.53	126.35	154.22	
		Std(σ)	54.18	69.81	79.27	91.71	
September		Month	Mean(μ)	153.86	197.52	235.01	286.55
			Std(σ)	101.15	130.13	148.76	170.55
		First	Mean(μ)	47.93	64.82	79.33	99.27
			Std(σ)	37.15	50.43	57.56	66
	Middle	Mean(μ)	62.32	62.32	62.32	62.32	
		Std(σ)	61.14	39.39	31.45	25.52	
	Last	Mean(μ)	43.61	65.22	83.77	109.1	
		Std(σ)	50.05	64.4	73.61	84.23	

Table 6. Actual Frequency of Precipitation

	July			
	Month	First	Middle	Last
High	24%	33%	29%	33%
Medium	38%	29%	29%	19%
Low	38%	38%	43%	48%
	August			
	Month	First	Middle	Last
High	24%	14%	33%	29%
Medium	33%	38%	29%	33%
Low	43%	48%	38%	38%
	September			
	Month	First	Middle	Last
High	29%	19%	33%	29%
Medium	24%	38%	5%	19%
Low	48%	43%	62%	52%

Table 7. Calculate Variable of Modification PDF-Ratio

Period		Variable	Native	Mod. PDF 50%	Mod. PDF 60%	Mod. PDF 60%	
July	Month	Mean(μ)	252.16	262.12	277.60	295.30	
		Std(σ)	128.14	136.56	147.10	158.02	
	First	Mean(μ)	81.64	79.81	80.12	80.22	
		Std(σ)	57.68	48.62	42.59	37.69	
	Middle	Mean(μ)	104.52	97.20	97.83	98.33	
		Std(σ)	85.43	71.75	62.77	55.50	
	Last	Mean(μ)	66.01	71.62	81.00	92.77	
		Std(σ)	52.11	80.75	90.32	101.76	
	August	Month	Mean(μ)	244.16	229.04	230.24	231.13
			Std(σ)	138.84	108.76	95.66	84.826
		First	Mean(μ)	87.86	67.03	68.77	69.76
			Std(σ)	111.34	80.09	70.67	62.41
Middle		Mean(μ)	73.15	58.52	49.14	39.00	
		Std(σ)	59.33	73.17	80.03	85.37	
Last		Mean(μ)	83.15	90.10	97.04	105.79	
		Std(σ)	54.18	63.20	67.78	74.24	
September		Month	Mean(μ)	153.86	159.37	175.14	194.39
			Std(σ)	101.15	141.29	156.49	173.94
		First	Mean(μ)	47.93	48.26	52.85	58.11
			Std(σ)	37.15	41.82	45.36	48.97
	Middle	Mean(μ)	62.32	48.12	50.08	51.50	
		Std(σ)	61.14	74.34	62.31	53.31	
	Last	Mean(μ)	43.61	44.23	52.71	63.44	
		Std(σ)	50.05	77.72	87.47	99.11	

4.3.2 수정 PDF-Ratio 가중값

수정 PDF-Ratio 가중값 부여방법은 우선 과거 강우자료의 통계적 분석이 선행되어야 한다. 과거 강우분포 $f_{(0)}$ 의 평년보다 많음, 비슷함, 적음의 기준이 되는 누기확률 33.3%와 66.7%에 해당하는 강우 $r_{33.3}$ 과 $r_{66.7}$ 을 산정한 후 $r_{33.3}$ 과 $r_{66.7}$ 을 기준으로 하는 과거 시나리오의 각 구간에 해당하는 빈도를 파악한다. 이는 과거 강우자료 통계분석과 기상청 강우예보자료를 함께 고려하는 것이다. 이에 따라 구간별 예측확률을 PDF-Ratio 가중값 부여방법과 다르게 설정하고 Eqs. (3)~(5)를 이용하여 가중값을 산정한다. Table 6은 과거 1990년부터 2010년까지 월, 상순, 중순, 하순의 구간별 강우 발생빈도이며 Table 7은 $f_{(2)}$ 의 월, 상순, 중순, 하순의 평균(μ)과 표준편차(σ)다.

4.4 양상블 예측 결과

본 연구에서는 예측점수와 RPS를 이용하여 예측정확도를 평가 및 분석하였다. 2011년 7월부터 9월까지 각월의 월, 상순, 중순, 하순의 기간에 따른 산정과 가중값 부여방법에 따라 산정한 예측점수 결과는 Table 8과 같다.

예측점수 결과 가장 높은 점수는 7월 월 분석 PDF-Ratio 가중값 부여방법의 96.20이며 가장 낮은 점수는 9월 하순 PDF-Ratio 가중값 부여방법의 11.56이다. 우선 평균 가중값 부여방법은 총 12개의 예측 중 4개의 예측이 33.3을 넘지 못하였으며 나머지 8개는 우수한 결과가 산정되었다. 또한 총 평균예측점수는 36.33, 예측점수 범위는 26.93~50.60으로 산정되었다.

PDF-Ratio 가중값 부여방법을 살펴보면 가장 높은 점수와 가장 낮은 점수를 포함하고 있다. 기상청 강우예보자료를 기준으로 하여 가중값을 산정하였기 때문에 강우예보와 실제 강우가 동일할 경우 매우 높은 점수가 산정되는 반면, 강우예보와 실제 강우가 동일하지 않을 경우 점수가 낮게 산정되었다. 또한 월별로 살펴보면 월별 결과보다 순별 결과에 더 낮은 점수가 산정되었다. 강우예보 정확도 가장별로 보면 강우예보가 50%의 정확도를 가지고 있다고 가정할 경우 12개의 예측 중 6개의 예측이 우수하다고 판단할 수 있으며, 60%와 70%의 정확도를 가지고 있다고 가정할 경우는 각 5개와 4개의 예측이 우수하다고 판단할 수 있다.

수정 PDF-Ratio 가중값 부여방법의 경우 강우예보가 50%, 60% 및 70%의 정확도를 가지고 있을 경우 각 12개의 예측 중 7개, 5개, 4개의 예측이 우수하다고 판단할 수 있다. 또한 강우예보가 50%의 정확도를 가진다고 가정할 경우 월별 분석에서 모두 예측이 우수한 것으로 분석되었다.

분석결과를 월별로 살펴보면 평균적으로 7월이 가장 우수한 예측점수 결과가 산정되었으며 다음으로 8월, 9월 순서로 산정되었다. 2011년 7월부터 9월까지 월별 및 순별 기간에 따른 산정과

Table 8. Prediction Hit Score

		Inflow Sector	Uniform Ratio	PDF-Ratio			Modification PDF-Ratio			Aver.
				50%	60%	70%	50%	60%	70%	
Jul.	Month	high	39.89	76.43	90.64	96.20	47.10	57.46	69.60	44.04
	First	high	46.13	36.44	33.61	22.85	38.57	36.81	35.14	
	Middle	high	50.60	53.00	56.16	59.92	47.96	48.43	49.33	
	Last	medium	28.40	23.88	18.97	14.31	20.93	18.63	16.47	
Aug.	Month	medium	41.17	49.27	57.50	66.60	48.23	51.44	54.84	33.92
	First	high	33.01	18.63	18.49	18.81	21.29	20.53	19.70	
	Middle	high	30.70	34.59	31.95	30.18	37.71	42.44	47.16	
	Last	low	35.44	23.46	19.70	16.84	28.82	26.61	24.62	
Sep.	Month	low	30.84	25.23	20.12	16.11	33.90	30.73	28.04	29.03
	First	low	36.98	26.85	19.30	11.84	42.06	36.79	31.77	
	Middle	medium	40.11	38.17	45.92	54.87	24.95	27.74	30.59	
	Last	low	26.93	26.38	17.65	11.56	30.88	25.45	21.06	
Aver.			36.63	36.03	35.83	35.01	35.20	35.26	35.69	35.66

Table 9. Ranked Probability Score

		Inflow Sector	Uniform Ratio	PDF-Ratio			Modification PDF-Ratio			Aver.
				50%	60%	70%	50%	60%	70%	
Jul.	Month	high	0.4037	0.0691	0.0108	0.0018	0.3497	0.2257	0.1150	0.3090
	First	high	0.3045	0.4202	0.4449	0.5957	0.4164	0.4283	0.4402	
	Middle	high	0.2822	0.2514	0.2067	0.1644	0.3288	0.3202	0.2972	
	Last	medium	0.2899	0.2988	0.3988	0.5255	0.3141	0.3499	0.3973	
Aug.	Month	medium	0.1747	0.2041	0.1400	0.0836	0.1649	0.1483	0.1305	0.5502
	First	high	0.5170	0.7992	0.7730	0.7343	0.8081	0.8124	0.8163	
	Middle	high	0.5550	0.5826	0.6424	0.6860	0.5212	0.4746	0.4338	
	Last	low	0.1970	0.8137	0.9564	1.0789	0.6483	0.7187	0.7906	
Sep.	Month	low	0.5351	0.7749	0.9526	1.1118	0.2516	0.2741	0.3006	0.6301
	First	low	0.4243	0.7569	1.0126	1.2340	0.4401	0.5625	0.6979	
	Middle	medium	0.1794	0.2248	0.1821	0.1307	0.2945	0.2909	0.2898	
	Last	low	0.6339	0.8430	1.1594	1.4169	0.7238	0.8952	1.0501	
Aver.			0.3747	0.5032	0.5733	0.6470	0.4385	0.4584	0.4799	0.4964

가중값 부여방법에 따라 산정한 RPS 결과는 Table 9과 같다.

RPS 산정 결과 예측점수와 마찬가지로 PDF-Ratio 가중값 부여 방법에서 가장 높은 값과 가장 낮은 값이 산정되었다. 가장 우수한 결과 값은 7월 월 PDF-Ratio 가중값 부여방법이며 가장 떨어지는 결과 값은 9월 하순 PDF-Ratio 가중값 부여방법으로 나타났다. 또한 월별로 살펴보면 7월에 가장 우수한 값이 나타났고 다음으로 8월, 9월에 우수한 값이 나타났다. 8월의 경우 순별 분석에서 1을 초과하는 값이 산정되었으며, 9월의 경우 월별 및 순별 분석에서 1을 초과하는 값이 산정되었다.

5. 결론

본 연구에서는 앙상블 예측기법과 SWAT 모형을 이용하여 안동댐의 월별 및 순별 유입량을 예측하였다. 댐유입량 앙상블을 생성하는데 필요한 강우-유출 모형으로 SWAT 모형을 사용하였으며 댐유입량 앙상블을 생성하기 이전에 모형의 검정을 수행하였다. 앙상블의 개수는 1990년부터 2010년까지의 각 월마다 21개의 앙상블을 사용하였다. 앙상블 예측기법의 가중값 부여방법으로는 균일 가중값, PDF-Ratio 가중값 및 수정 PDF-Ratio 가중값 부여방법을 사용하였

으며, PDF-Ratio 및 수정 PDF-Ratio 가중값 부여방법에 사용하는 강우예보자료는 기상청의 대구·경북 강우예보자료를 사용하였다.

가중값 부여방법에 따른 예측 정확도는 균일 가중값 부여의 경우 양상불 예측기법의 적용 효율성을 입증하기에 적합하다고 판단되었다. 월별 및 순별 예측에서 대체적으로 예측정확성은 예측이 잘되었다고 판단할 수 있으며 평균적으로도 우수하다고 판단되었다. PDF-Ratio 가중값 부여방법의 경우 가중값 산정은 강우예보에 의존하기 때문에 강우예보와 비슷한 시나리오에 높은 가중치를 부여하게 된다. 따라서 강우예측 구간과 실제 강우발생구간이 동일하다면 예측정확도가 매우 향상되나 상이할 경우 현저하게 낮아지는 것을 알 수 있었다. RPS를 분석해보면 예측이 우수할 경우 0에 가까운 값을 나타내지만 예측이 맞지 않을 경우 1을 초과할 정도의 큰 값이 산정되었다. 이는 강우예보구간에 예측확률이 크게 편향되어 있다는 것을 나타낸다. 예측점수의 평균을 보면 예측 정확도는 전체적으로 우수하다고 판단할 수 있으나 편차가 심하기 때문에 모두 사용 가능하다고 판단하기에는 어려움이 있었다. 따라서 편차를 감소시키기 위한 목적으로 수정 PDF-Ratio 방법을 적용하였다. 수정 PDF-Ratio 방법의 강우예측 정확도를 50%로 가정한 월별 분석의 경우 모두 33.3이 넘는 우수한 결과가 도출되었다. 그러므로 월별 분석에서는 과거 강우발생구간 빈도를 적용한 것이 가장 안정적인 결과를 도출하였다고 판단되었다. 또한 RPS를 살펴보면 강우예보구간과 실제구간이 동일하지 않은 경우 적용된 PDF-Ratio 가중값 부여방법의 7월의 상순 및 하순, 8월의 중순 및 하순, 9월의 월별, 상순 및 하순에서 수정 PDF-Ratio가 RPS 값을 낮추는 경향을 발견할 수 있었다. 이는 수정 PDF-Ratio의 방법을 이용하면 PDF-Ratio 방법의 편차를 감소시키고 편향되는 예측성향을 완화시킬 수 있다는 것을 나타낸다. 또한 전체적으로 월별보다 순별 예측에서 정확도의 편차가 큰 것은 강우예측과 실제 강우발생 구간이 상이한 점도 있지만 유역에 강우가 발생하였을 때 댐으로 유입되기까지 도달시간이 있으므로 강우가 순별 구간의 마지막 지점에 많이 발생할 경우 댐유입량은 다음 순별에 나타나는 것도 예측의 정확성에 영향을 미친다고 판단되었다. 강우가 평년보다 적음, 비슷함, 많음의 경계구간 근처에 발생한 경우 강우가 평년보다 많이 왔다고 판단되어도 그것이 바로 댐유입량이 평년보다 많음으로 연결되지 못하는 부분도 있었다.

결론적으로 전체적인 예측이 우수한 경우를 살펴보면 평균가중값 부여 방법이 12개의 기간 분석 중 8개의 예측이 우수하여 효율성이 높으며, 월별 예측에서는 수정 PDF-Ratio 방법 중 강우예보가 50%의 정확도를 가지고 있다고 가정하는 경우 가장 적용성이 뛰어나다고 판단된다. PDF-Ratio 가중값 부여방법의 경우 가장 높은 점수가 나타나지만 예측이 맞지 않을 경우 편차가 심하기 때문에 활용이 어렵다고 판단된다. 하지만 예보자료의 양이 많아지

고 이에 따른 분석이 가능하다면 편차는 감소할 것이며, 강우예보의 정확도가 향상된다면 효율성이 높아질 것이라고 사료된다. 평균 순별 예측의 경우 정확도의 편차가 큰 경우가 있지만 효율성이 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, J. M., Lee, S. J., Kim, J. K., Kim, J. C., Maeng, S. J. and Woo, D. H. (2011). "Estimation of ESP probability considering weather outlook." *Journal of Korea Society on Water Quality*, Vol. 27, pp. 264-272 (in Korean).
- Bradley, A. A., Schwartz, S. S. and Hashino, T. (2003). "Distributions-Oriented verification of ensemble streamflow predictions." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 5, pp. 532-545.
- Faber, B. A. (2000). *Reservoir optimization using sampling stochastic dynamic programming (SSDP) with ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts*, Ph.D. Dissertation, University of Cornell, America.
- Franz, K. J., Hartmann, H. C., Sorooshian, S. and Bales, R. (2003). "Verification of national weather service ensemble streamflow predictions for water supply forecasting in the Colorado river basin." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 4, pp. 1105-1118.
- Jung, D. I. (2002). *Forecasting monthly inflow to Chungju Dam using ensemble streamflow prediction*, MS. Thesis, University of Seoul, Korea.
- Kang, T. H. (2008). *Pre- and post-processors of ensemble streamflow prediction system*, MS. Thesis, University of Seoul, Korea.
- Olsson, J. and Lindstrom, G. (2008). "Evaluation and calibration of operational hydrological ensemble forecasts in Sweden." *Journal of Hydrology*, Vol. 350, pp. 14-24.
- Roulin, E. (2006). "Skill and relative economic value of medium-range hydrological ensemble predictions." *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 3, pp. 1369-1406.
- Smith, J. A., Day, G. N. and Kane, M. D. (1992). "Nonparametric framework for long-range streamflow forecasting." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 118, pp. 82-92.
- Stedinger, J. R., Vogel, R. M. and Foufoula-Georgiou, E. (1992). *Handbook of hydrology*, McGraw-Hill, p. 1811.
- Stedinger, J. R. and Kim, Y. O. (2010). "Probabilities for ensemble forecasts reflecting climate information." *Journal of Hydrology*, Vol. 391, pp. 9-23.
- Wilks, D. S. (1995). *Forecast verification : Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press, USA