

## 농업용수 이용량을 고려한 금강유역 장기유출모의

우동현 · 이상진\* · 김주철 · 안정민

(한국수자원공사 K-water연구원)

**Long-term Runoff Simulation Considering Water for Agricultural Use in Geum River Basin. Woo, Dong Hyeon, SangJin Lee\*, JooCheol Kim and Jung Min An (K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Korea)**

**This study aims at the augmentation of reliability of the long-term rainfall runoff model. To do so agricultural water uses are evaluated by analyzing the effects of small scale irrigational hydraulic structures on long term runoff processes and thereby rainfall-runoff model is modified considering them. As a result the simulation results of the sub-basins having more agricultural reservoirs than the others are disagreed with the observations. The 2nd quarter simulation results show similar trend to it. Especially the farming seasonal results of the drought year as the year of 2008 have many negative discharge values due to the lack of agricultural water uses. This result come from the water uses input data corresponding to not real water uses but water demands. In this study the formulas are derived to estimate the discharges and return ratios and the long term rainfall-runoff model is reformulated based on these. It is confirmed that the errors of the simulation results could be reduced by considering the effects of small scale irrigational hydraulic structures and the reliability of the simulation results improved greatly.**

**Key words : irrigation facilities, irrigation area, long-term streamflow, SSARR model**

### 서 론

21c 들어 지구온난화 및 기후변화가 수자원에 미치는 영향이 커지고 있음을 경고하는 보고사례(IPCC, 2008)가 증가하는 등 기존의 단편적인 물관리 운영체제에서 벗어난 유역단위의 과학적인 수자원 관리에 대한 기술이 향상되고 있다. 그러나 유역단위의 물관리를 위하여 장기 유출모형을 구축하는 경우 일반적으로 대규모 유역을 대상으로 하고 있기 때문에 기존의 소유역내의 단순한 수자원 관리방법과는 달리 여러 복합적인 수리수문학적 특성으로 인한 불확실성을 내포하고 있다. 이 중 대표적으로 해석하기 어려운 것 중에 하나가 농업용수 이용량과 회귀

율의 정량적 파악일 것이다.

농업용수 이용량 산정은 통상적으로 수요에 따른 유역의 단위계획량을 산정하고, 이용특성상 재이용이 가능한 회귀수 분석을 통하여 회귀율을 산정하는 방법이 적용되고 있으나, 이처럼 분석된 농업용수량은 가뭄으로 인한 부족량이나 용수회귀량을 반영하기 어렵기 때문에 실 사용된 값과 차이가 있다. 이와 관련하여 농업용수 이용량 및 회귀량 산정에 관한 연구가 최근까지 다양하게 수행되고 있다. 일본에서는 Volterra적분방정식을 이용한 다중회귀식을 만들어 논의 유출특성을 분석, 다중회귀식과 실측자료로부터 산정한 논의에서의 회귀율을 49.3%라고 보고 하였고(Ito *et al.*, 1980). 인도에서는 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)모형에 계층구조모델(Hierarchi-

\* Corresponding author: Tel: (042) 870-7402, Fax: (042) 870-7419, E-mail: sjlee@kwater.or.kr

cal model)을 적용해 관개회귀수량을 산정하는 연구가 수행 되었는데 이 연구에서 모형을 통한 관개회귀수량 산정결과와 관측치 간에 높은 상관성을 보여주었다(Mohan, 2009).

국내 대규모 유역에 대한 농업용수량 산정사례를 보면 원단위법과 같은 간접적인 추정방법이 주로 이용되었다(건설교통부, 2001). 이런 간접적인 추정방법은 원단위 용수량의 변화가 시·공간적으로 둔감하게 변화하는 생활용수와 농업용수를 산정하기에는 적합한 방법이지만 강우, 증발 및 유역유출 등에 직접적인 영향을 받아 시·공간적으로 민감하게 변화하는 농업용수 이용량을 합리적으로 산정하기에는 어려움이 있다. 그러나 기존의 연구는 주로 수문학적 통계분석 방법과 실측에 의한 회귀식개발 등에 의한 방법을 통하여 농업용수 이용량을 산정하였다(한국수자원공사, 2006).

본 연구는 유역 내 소규모 수리시설물이 장기유출에 미치는 영향에 대해 시·공간적으로 분석해 농업용수 이용량을 추정하였다. 이를 토대로 수리시설물의 영향을 반영할 수 있도록 유출모형을 구성함으로써 유역의 장기유출 모의결과와 신뢰도를 증진시키고자 한다.

**재료 및 방법**

**1. 대상유역 및 장기유출모형 구축**

본 연구의 대상유역은 한국의 주요 4대강 유역 중 하나인 금강유역으로 면적이 9,912.15 km<sup>2</sup>이고 하도길이가 395.9 km이다. 본 유역의 소유역 분할은 수자원 단위지도를 기본으로 하여 국가 수자원 계획인 장기용수공급계획과 유역종합개발계획 등을 종합적으로 고려하였다. 용담댐 상류구간은 3개의 소유역으로, 용담댐부터 대청댐까지의 구간은 4개, 그리고 대청댐이하 하구까지는 7개 등 총 14개의 소유역으로 분할하였다. 이를 토대로 유역

의 장기유출을 모의할 수 있는 모델을 구축하였다. 개발된 모델은 미 공병단에서 개발한 SSARR모형을 엔진으로 탑재하여 타 유역에도 적용 가능하도록 재해 지향적인 범용화 GUI를 구현하였다. SSARR모형은 1956년 처음 개발된 이래, 수자원 실무에 활용되고 있으며 미국의 Columbia 강(Rockwood, 1961)과 베트남의 Mekong 강(Rockwood, 1968) 등과 같은 대하천에 성공적으로 적용된 바 있다. 한국에서는 SSARR를 이용하여 낙동강수계에 대한 실시간 저수관리 시스템을 개발하였고 현재 타 유역에 확장 적용하고 있다(한국수자원공사, 1996). 2009년 광재원 등은 SSARR모형을 이용하여 미호천 유역에 대하여 홍수모의 예측을 수행하고 그 효율성을 분석하였다

금강유역에 모델 적용을 위해 14개 소유역에 대한 일강우량, 관측유량, 생·공·농업용수 계획량, 취수량, 댐유입량, 댐 방류량 및 온도 등을 수집하였다(건설교통부, 2001). 그리고 수집된 관측자료 중 결측 및 이상치에 대한 검증 및 보정을 실시하였다.

Table 1은 개발된 모델의 모의사전단계를 보여주고 있다. 이 단계는 관측값과 모의값의 비교분석을 통해 각 매개변수들을 실제값에 근접하게 보정하여 유출모의에 적용하기 위한 과정이다. 매개변수의 보정은 주요지점별로 민감도가 가장 큰 SMI(토양습윤지수)와 S-SS(지표수와 복류수 분리비), BII(지하수 유입률), BFLIM(최대지하수 유출율), PBLZ(지하수중 회귀지하수가 차지하는 비율) 및 Ts(기저유량의 저류시간) 등을 대상으로 하였다,

**2. 수리시설물을 고려한 농업용수 이용량 및 회귀율 추정식**

소규모 수리시설물로는 저수지(Reservior), 양수장(Pumping station), 보(weir) 및 관정(Tube well) 등이 대표적 시설물이다. 이 시설물들은 하천유량의 변화( $F_D$ )에 각기 다른 영향을 준다. 저수지에 의한 공급이 많은 지역은 저수지의 용수 공급( $W_S$ )으로 인한 회귀수( $R_S$ )가 하천

**Table 1.** Case for parameters calibration (Yongdam point).

SMI	Runoff of percent (%)	BII	Runoff of percent (%)	SSS	Input to surface
0	7	0	46	0	0
1	80	1	17	0.5	0.05
2	90	1.5	15	1	0.39
3	95	2	13	1.5	0.89
4	96	2.5	12	2	1.39
5	97	3	11	2.5	1.89
8	98	5	10	3	2.39
10	99	100	10		
999	100				

**Table 2.** Water supplied farmland area of facilities and river water use rates for the each sub-basin.

Basin no.	Total area (km <sup>2</sup> )	Farm area (km <sup>2</sup> )	Reservoir (km <sup>2</sup> )	Pumping (km <sup>2</sup> )	Weir (km <sup>2</sup> )	Infiltration gallery (km <sup>2</sup> )	River water use (%)
B.01	279.51	26.72	22.12	0.67	3.71	0.22	17
B.02	165.59	4.57	3.41	0.00	1.16	0.00	25
B.03	477.31	12.31	8.41	0.11	3.50	0.30	32
B.04	595.12	10.79	5.63	0.30	4.82	0.04	48
B.05	389.52	19.19	8.18	4.81	5.18	1.02	57
B.06	1062.31	71.58	42.71	13.80	12.69	2.38	40
B.07	1209.11	76.94	50.02	13.58	11.37	1.97	35
B.08	753.02	24.33	6.33	3.67	13.42	0.91	74
B.09	1853.12	139.64	102.30	21.83	14.70	0.82	27
B.10	605.21	9.66	1.75	3.49	3.34	1.09	82
B.11	999.12	109.28	45.52	32.63	31.11	0.02	58
B.12	467.11	84.12	69.57	5.62	7.79	1.15	17
B.13	562.61	197.9	24.17	170.67	2.32	0.70	88
B.14	527.12	83.19	65.07	17.34	0.14	0.64	22

으로 유입됨으로써 하천유량이 증대되는 효과가 나타나며 양수장 및 보에 의한 용수공급이 많은 지역은 직접 하천에서 원수를 취수하여 용수( $W_L$ )로 이용한 후 회귀수( $R_L$ )만을 하류하천으로 방류하기 때문에 하천유량을 감소시킨다. 또한 지하수를 원수로 공급하는 관정이나 집수암거 등은 직접적으로 하천수를 이용하지는 않지만 하천에 근접한 경우 저하된 지하수위를 충족하기 위해 인근하천수( $W_G$ )를 흡수할 수 있다. 지하수의 흐름은 장기간에 걸쳐 이루어지기 때문에 관정이나 집수암거에 의한 용수공급이 하천유량에 끼치는 영향은 다른 수리시설물에 비해 미미할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 각종 수리시설물에 의한 하천유량의 변화를 식(1) 및 (2)로 정의하였다.

$$F_S = F_N - F_D \quad (1)$$

$$F_D = (W_L + W_G) - (R_S + R_L + R_G) \quad (2)$$

식(1)에서  $F_S$ 는 모의하천유량,  $F_N$ 는 자연하천유량이며 소규모 수리시설물에 의한 하천수 변화량은  $F_D$ 이다. 식(2)에서  $R_S$ 는 저수지,  $R_L$ 는 양수장 및 보,  $R_G$ 는 관정 및 집수암거에 의해 공급된 용수에 대한 회귀량이다.

각종 수리시설물들은 하천유량에 각기 다른 영향을 미치고 있다. 따라서 유역내 수자원의 효율적 관리를 위해서는 유역내 수리시설물별 용수공급비율이 반영된 용수량 및 회귀율이 산정되어야 한다. 그러나 현재 각 소유역별 수리시설물들을 통한 용수이용량 파악은 매우 어려울 뿐만 아니라 해당자료에 대한 신뢰성도 매우 낮은 실정이다. 본 연구에서는 다양한 수리시설물의 수혜면적 영향을 반영할 농업용수 이용량 및 회귀율을 산정할 수 있도록 류와 이(2008)이 제안한 공식을 활용하였다. 이 공식은

유역관리모형에 적용될 용수 이용량 및 회귀율을 소규모 시설물에 의한 총 수혜면적 중 저수지에 의한 수혜면적을 고려하여 도출된 관계식이다.

Table 2은 소규모 수리시설물의 영향평가를 위해 대상 유역내 각 소유역(Sub-basin) 별로 하천수를 직접 이용하고 있는 경작면적비를 산정하여 용수이용 중 하천수 의존도를 조사하였다. 그 결과 13번 소유역은 양수장을 통한 하천수 공급에 의존하는 농경지의 비율이 높아 하천수 의존도가 가장 크게 나타났다. 호탄, 매포, 공주지점 상류인 5번, 8번, 10번 소유역은 양수장이 다수 존재하고 있지는 않지만 농업용 저수지가 거의 분포하고 있지 않아 하천수 이용률이 60%가 넘게 나타났다. 이에 반해 용담댐 상류인 1, 2, 3번이나 대청댐 상류인 7번 그리고 9번, 12번, 14번 소유역은 곳곳에 중규모 이상의 농업용 저수지가 다수 분포하고 있음으로 인해 상대적으로 하천수 의존도가 적게 분석되었다.

## 결과 및 고찰

### 1. 유출모의결과

본 분석에서는 유출모의결과가 부정확하게 나타나는 주요원인을 유역 내 존재하는 소규모 수리시설물의 특성이 반영되지 못하였기 때문이라고 판단하였다. 이에 대한 검증용 위해 통상적으로 사용되는 소규모 시설물을 고려하지 않은 유출모의와 본 연구에서 제시한 소규모 수리시설물의 영향을 고려하여 보정한 유역유출모의를 실시하였다.

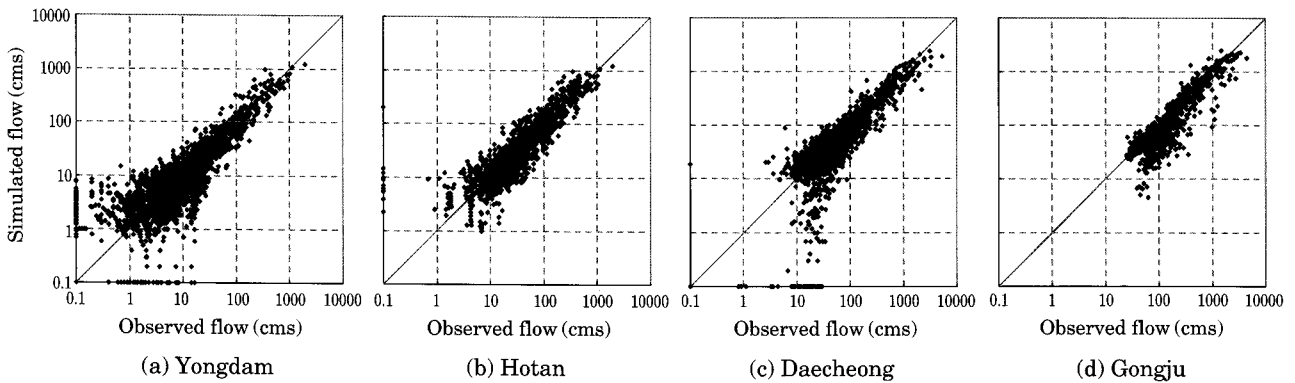


Fig. 1. Runoff simulated without considering small scale irrigation facilities.

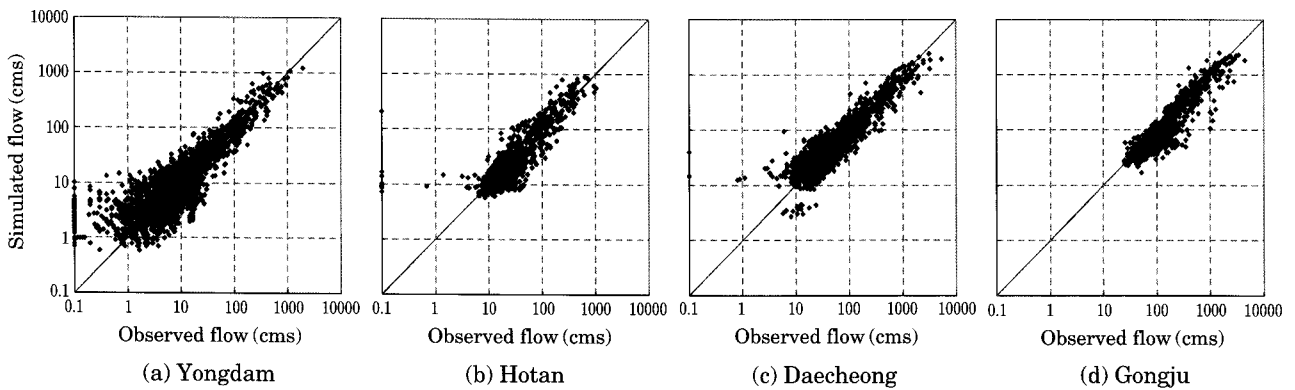


Fig. 2. Runoff simulated with considering small scale irrigation facilities.

Fig. 1은 2001년부터 2008년까지 장기유출모의를 통해 계산된 금강유역 주요 지점별 일 단위 유출모의값을 관측값에 대응하여 산포도 그래프를 그려본 결과이다. 관측값과 차이가 큰 이상치들이 산발적으로 분포함을 볼 수 있다. 이 중  $y=0.1$ 축 방향의 이상치들은 유출모의값( $y$ 축)이 관측값( $x$ 축)보다 작게 산정되어 나타나는 것이다. 이는 중·소규모 저수지에서의 이용량이나 그 밖의 소규모 수리시설물 등에서의 회귀량 등 그 특성을 반영하지 못하여 용수 이용량이 과다 산정되어 나타난 결과로 판단된다. 하천수 의존도가 비교적 작았던 대청지점이나 용담지점의 경우 이러한 저유량 이상치들이 다수 나타났다. 하지만 하천수 의존도가 상대적으로 큰 호탄지점이나 공주지점에서는 비교적 양호한 유출모의결과가 나타났다.

Fig. 2는 농업용수이용량 추정식을 통하여 소규모 수리시설물의 특성을 반영한 유출모의를 보여주고 있다. 앞에서 나타났던 저유량 이상치들이 대부분 없어지고 유출모의가 상당히 개선됨을 확인할 수 있다. 용담지점의 경우  $y=0.1$ 축뿐만 아니라  $x=0.1$ 축 방향으로도 불량한 모의가

다수 나타났다. 앞서  $y=0.1$ 축에 근접한 이상치들은 소규모수리시설물의 영향을 고려함으로써 개선되었다. 하지만  $x=0.1$ 축의 근접한 이상치들은 소규모수리시설물의 영향과 관계없이 관측값의 결측 및 부정정한 측정의 결과로 판단된다.

2. 오차분석

일반적으로 가뭄 년은 강수량이 적고 대기가 건조하여 상대적으로 증발량이 많아지는 시기이다. 따라서 순물소모개념으로 산정된 농업용수 계획량은 상대적으로 평년보다 증가한다. 하지만, 실제 이용량은 유출의 감소 등으로 인해 필요수량을 충족시키지 못하기 때문에 오히려 평년 용수이용량보다 적게 용수가 이용될 것이다. 이로 인해서 농업용수 계획량자료를 활용한 유출모의결과는 가뭄년에 상대적으로 오차가 더욱 커질 것으로 예상된다. Fig. 3은 연도별 금강 주요지점 평균유출오차와 강우량을 산정해 비교해본 결과이다. 비가 매우 적게 내린 2001년과 2008년에 오차가 커짐을 확인할 수 있다. 이는 가뭄

으로 인해 용수공급에 많은 차질이 발생함에 따른 것으로 판단된다.

유출오차가 크게 나타난 2008년을 대상으로 대청지점의 장기유출량 모의분석을 실시하여 관측값과 모의값 사이의 Pearson상관계수를 보정 전/후로 산정해 보았다. 보정 전 유출량 모의는 기존 용수산정방법인 원단위법에 의한 용수량을 이용하여 유입량을 모의한 결과로서 소규모 수리시설물의 특성을 반영하지 못한 결과이다. 보정 후 유출량 모의는 본 연구에서 제시한 소규모 수리시설물을 고려하여 보정한 용수량을 이용한 결과이다. 상관분석결과 Table 3에서와 같이 보정을 통한 모의가 관측값과의 상관성이 높아졌다.

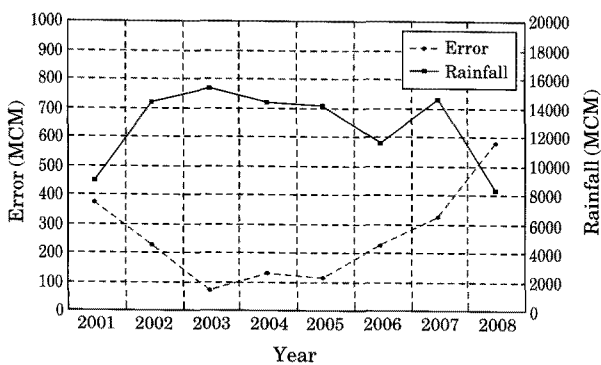
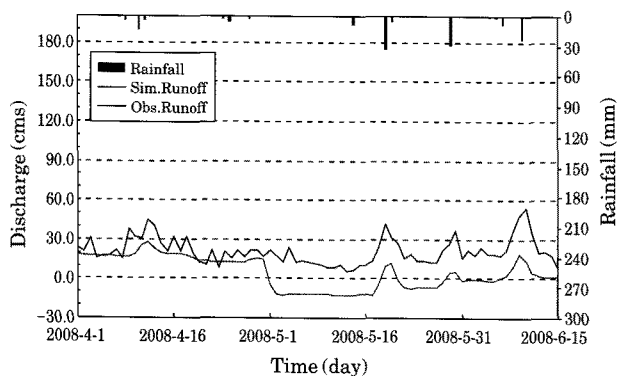
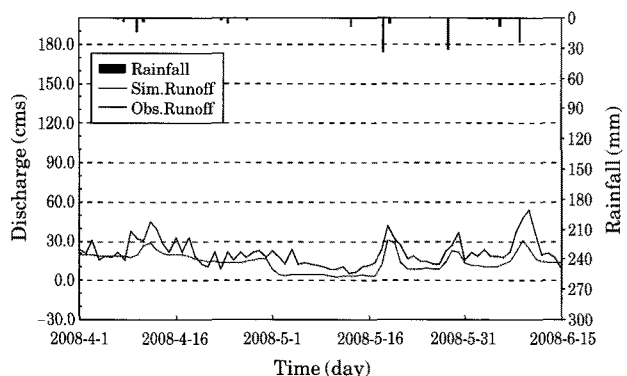


Fig. 3. Runoff error and rainfall.



(a) Non-modified



(b) Modified

Fig. 4. Comparison of observed inflow with simulated inflow (2008, Daechong).

Fig. 4는 보정전의 통상적인 방법과 보정후의 소규모 수리시설물을 고려해 보정한 유출량 모의 분석을 관측값과 함께 도시한 결과로 논농사가 본격적으로 시작되는 2분기, 5월부터 유출량이 음의 값으로 모의되고 있음을 볼 수 있다. 이는 유출모의 시 저수지 등의 소규모 수리시설물을 통한 농업용수이용 및 회귀수를 적절히 반영하지 못하여 나타난 결과로 보정을 통해 이를 반영함으로써 유출모의가 상당히 개선되는 것을 볼 수 있다.

관측값과 모의값 사이의 차이, 즉 오차를 보다 정량적으로 평가하기 위하여 식(3)에 따라 불일치율( $R_D$ )이란 개념이 정의되어 이용된다(Cheong and Seo, 2003).

$$R_D = \log(Q_p/Q_m) \quad (3)$$

여기서,  $Q_p$ 는 모의된 유량이고,  $Q_m$ 은 관측된 유량이다. 만약 불일치율(Discrepancy Ratio)이 0으로 나오면 모의된 값이 관측 값과 같다는 것을 의미한다. 불일치율이 0보다 크거나 작으면 모의유량이 과다 산정되거나 적게 산정되었다는 것을 의미한다.

Table 4에서 전반적으로 보정을 통한 모의가 적은 불일치 범위에 다수 포함되었다. 특히 계획량을 이용하여 모의한 보정 전 불일치율을 보면 -2에서 -2.5 사이의 저유량 오차구간에 전체오차의 3%를 차지하는 75개의 불일치율 나타났다. 이는 보정을 통한 이용량을 사용하여 모의함으로써 보정되었다.

Table 3. Correlation analysis between observed inflow and simulated inflow.

Irrigation water	Daechong			
	Correlation coefficient	Coefficient of determination	P-value	Significance ( $\alpha=1\%$ )
Non-modified	0.580	0.336	0.000	Regard
Modified	0.788	0.621	0.000	Regard

Table 4. Result of discrepancy ratio analysis.

Station	Irrigation water	Discrepancy ratio (%)					
		±(0~0.1)	±(0~0.3)	±(0~0.5)	±(0~1)	±(0~2)	-(2~2.5)
Daecheong	Non-modified	56.4	84.6	91.9	95.8	97.0	3.0
	Modified	63.2	93.7	99.0	99.8	100	0

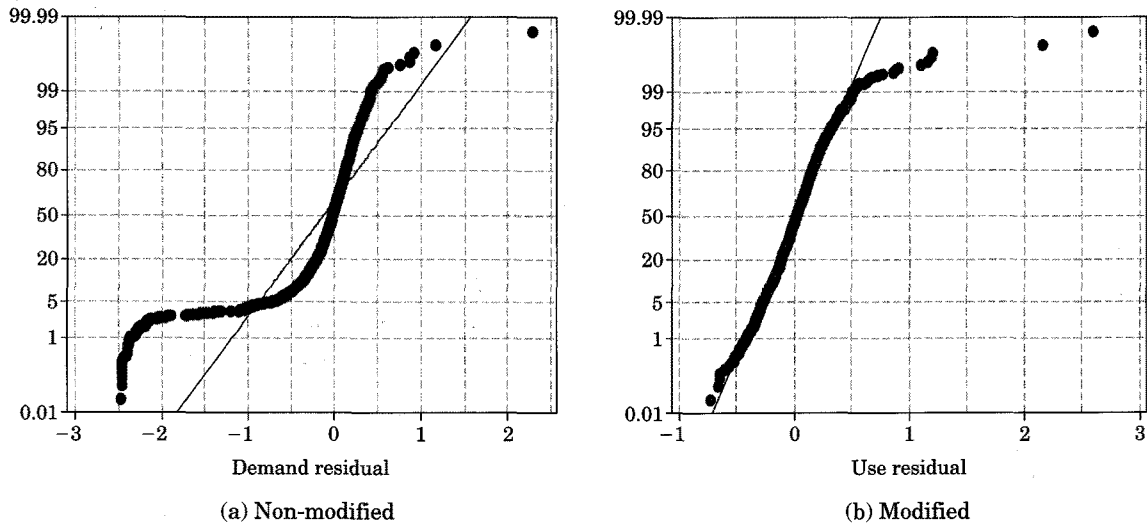


Fig. 5. Normal probability plot for residuals.

불일치율( $R_D$ )은 관측값( $\log Q_m$ )과, 모의값( $\log Q_p$ )의 잔차(Residuals)이므로 잔차분석을 통해 대청지점의 보정 전/후로 모의타당성 검정을 실시해 보았다. 잔차분석은 잔차들이 서로 독립이며 정규분포를 하는지를 판단하는 것으로 독립성 여부에 대한 검정을 위해 자기상관분석을 통한 Durbin-Waston검정을 실시하였다. Durbin-Waston통계량은 0에서 4사이의 값으로 2에 가까울수록 오차항들의 독립성을 충족함을 나타내고 0에 가까우면 양의 자기상관, 4에 가까우면 음의 자기상관을 나타낸다. DW통계량 검정결과 보정전 0.30에서 보정후 1.12로 보정을 통한 모의가 잔차의 독립성을 더욱 잘 충족한다고 판단되었다.

정규성 검정은 정규확률플롯(Normal probability plot)을 이용하여 판단할 수 있다. 잔차에 대한 정규확률플롯에서 점들이 직선에 가깝게 위치하여 있으면 잔차가 정규분포를 따른다고 할 수 있으나, 곡선의 형태를 가지고 있으면 잔차가 정규분포를 따른다는 가정은 옳다고 할 수 없다. Fig. 5는 대청지점의 유출모의 잔차를 정규확률플롯에 도시결과로 보정을 통한 모의(b)가 보정전(a)보다 정규분포를 잘 따른다는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과들로 보정을 통해 모의의 타당성이 개선된다고 판단할 수 있다.

적 요

본 연구에서는 유역의 효율적인 물관리를 위해 이수적인 측면에서 입력되는 농업용수를 수요측면에서 산정된 계획량에서 실 이용량에 근사하게 보정하는 방법을 제시하고 장기유출모형을 활용하여 실용성이 높은 결과를 도출하고자 하였다. 본 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 농업용 수리시설물들이 하천유량에 끼치는 영향을 분석하여 농업용수 이용량을 고려한 장기유출을 모의하였다. 그 결과 하천수 의존도가 낮은 지점에서 관측값과 차이가 큰 불량한 모의가 주로 발생하였다.
- 2) 연강우량과 유출오차와의 상관관계를 분석한 결과 2001년이나 2008년과 같은 가뭄년에 실제 용수이용을 충족시키지 못하여 유출모의시 오차가 커짐을 확인하였다.
- 3) 장기유출량 모의분석을 통해 논농사가 본격적으로 시작되는 5월부터 유출량이 음의 값으로 모의되고 있음을 확인하였다. 소규모 수리시설물을 고려하여 보정한 용수량을 이용한 결과 상관계수가 보정전 0.580에서 보정후 0.788로 보정전 모의보다 관측값과 상관성이 높아짐을 정량적으로 확인하였다.

4) 주요지점의 불일치율( $R_D$ ) 분석결과 전반적으로 보정을 통한 모의가 적은 불일치 범위에 다수 포함됨을 정량적으로 확인하였다. 특히 대청지점의 불일치율 분석결과 -2에서 -2.5사이의 저유량 오차구간에 전체오차의 3% 차지하는 75개의 불일치율 나타났다. 이는 소규모수리시설물을 고려하지 못하고 용수량이 과다 산정되어 나타나는 오차로 본 연구에서 제시한 방법을 통해 모두 개선되었다.

5) 잔차분석을 통해 대청지점의 보정 전/후로 모의타당성 검정을 실시하였다. 잔차의 정규성 및 독립성을 분석한 결과 보정을 통해 모의의 타당성이 개선됨을 확인하였다.

### 사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(1-6-3)에 의해 수행되었습니다.

### 인 용 문 헌

건설교통부. 2001. 수자원 장기종합계획 보고서.  
 광재원, 김덕길, 홍일표, 김형수. 2009. 강우-유출모형을 위한 매개변수 순차 보정기법 연구. 한국습지학회지 11(2): 107-

121.  
 류경식, 이상진. 2008. 수리시설물별 관개면적을 고려한 유출 변화특성분석. 한국수자원학회지 41(6): 643-651.  
 한국수자원공사. 1996. 낙동강수계 실시간 최적 저수관리 시스템 개발 보고서.  
 한국수자원공사. 2006. 금강유역조사 보고서.  
 Cheong, T.S. and I.W. Seo. 2003. Parameter estimation of the transient storage model by routing method for river mixing processes. *Water Resources Research* 39: 1074-1084.  
 IPCC. 2008. Climate Change and Water, IPCC Technical paper VI.  
 Ito, Y., H. Shiraishi and R. Oonishi. 1980. Numerical estimation of return flow in river. *JARQ* 14: 24-30.  
 Mohan, S. 2009. Prediction of irrigation return flows through a hierarchical modeling approach. *Agricultural Water Management* 96: 33-246.  
 Rockwood, D.M. 1961. Columbia basin streamflow routing by computer, Transactions, American Society of Civil Engineers, No. 3119.  
 Rockwood D.M. 1968. Application of stream-flow synthesis and reservoir regulation "SSARR" Program to the lower Mekong river, The use of analog and digital computer in hydrology symposium, International Association of Scientific Hydrology, UNESCO, p. 329-344.

(Manuscript received 1 June 2010,  
 Revision accepted 30 June 2010)