

댐유입량과 농업용수 수요량 예측을 위한 추계학적 모형

윤용남* 김태균**

1. 서론

최근 활발히 연구되고 있는 각종 수자원 관련 시스템 최적화 방안에 관한 연구중 댐의 경우는 발전, 홍수예방 또는 용수의 안정적 공급을 목적으로 하고 있다. 이중 용수의 안정적 공급을 목적으로 할 경우, 용수 수요량을 일정하다고 가정하거나 또는 과거의 자료를 기초로 하여 수요량을 산정하고 있다.

그러나 생·공용수와 달리 농업용수의 경우는 기상상태 및 수도재배역에 따라 기간별로 많은 차이를 보이며, 저수지 유입량 역시 기상상태(강우)에 따라 좌우되므로, 농업용수와 저수지 유입량은 어떤 상관관계를 가지고 있다.

본 연구에서는 저수지에 대한 최적화 방안 연구에 필요한 농업용수와 저수지 유입량을 예측할 경우 이들의 상관성을 고려하여 추계학적 방법에 따라 예측할 수 있는 모형을 개발하고자 한다.

2. 대상 유역 및 저수지

본 연구의 대상 유역으로는 농업을 중심으로 하는 동진강 유역을 선택하였고, 농업용수 산정을 위한 기상상태는 전주측후소의 자료를 이용하였으며, 대상 저수지로는 동진강 유역의 농경지에 농업용수를 공급하는 섬진강 다목적댐을 선정하였다.

추계학적 모형을 위한 전주관측소 기상자료와 섬진강댐 유입량 자료는 1975년 - 1990년의 자료를 대상으로 하였고, 농업용수 산정 및 유입량 예측을 위한 시간구간(time interval)은 농업용수 산정에 많이 이용되는 1일을 기준으로 하였다.

앞에서 설명한 바와 같이 예측기간이 순별이므로 주기성(Periodic) 모형이 되며, 본 연구에서는 PAR(p), 또는 PARMA(p,q)을 이용하고자 한다. AR(p) 모형의 경우는 ARMA(p,q) 모형중 Moving AVERAGE term의 상관성이 없는 것이므로 PARMA(p,q)를 기준으로, 모형 선정 절차에 따라 모형을 완성하고자 한다.

3. 댐유입량 예측을 위한 추계학적 모형의 선정

3.1 섬진강댐 유입량의 통계분석

1975년 부터 1990년의 섬진강댐 일유입량 자료를 획득하여 순별로 합산한 후 이를 통계분석한 결과가 표 1.에서 나타나 있다.

* 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

** 고려대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정

표 1. 섬진강댐 순별 유입량 통계특성치

단위 : CMS

주 기	산 술 치			대 수 치		
	평 균	분 산	왜곡도계수	평 균	분 산	왜곡도계수
1	4.61647	6.00271	2.55655	1.10266	.84751	.89073
2	4.01059	4.76167	2.34336	.87087	1.16258	-.81623
3	4.21712	4.84701	1.81494	.92356	1.07438	-.03858
4	3.41706	2.44711	1.32690	.94372	.87604	-.80437
5	12.09588	15.09959	1.14626	1.57029	1.64027	-.58322
6	10.57824	12.53766	1.83274	1.73511	1.22125	-.12330
7	12.49177	11.99450	1.56327	2.13986	.92937	-.08449
8	10.98412	8.62651	1.25188	2.14271	.72849	.16997
9	10.98712	7.93680	1.44497	2.18264	.67551	.04612
10	13.69000	16.32327	1.70946	1.99885	1.17969	.09541
11	14.33059	13.82885	1.36168	2.23512	1.01576	-.33207
12	14.82706	13.98844	1.13266	2.18222	1.15099	-.26062
13	12.77470	12.11529	1.22483	1.98575	1.26733	-.53969
14	8.35706	9.37139	1.43834	1.64893	.96819	.43433
15	5.37112	5.69625	1.85983	1.23215	.99012	.09096
16	16.50359	20.38995	1.29034	1.66105	2.50713	-2.18290
17	10.25353	10.18037	1.28153	1.83526	1.11648	-.40167
18	43.54412	59.61204	1.21662	2.77283	1.54430	.13541
19	48.49353	70.16424	1.40119	2.80993	1.56231	.28333
20	71.35589	48.03861	-.00438	3.78073	1.33156	-1.20391
21	45.71388	61.73939	1.38120	2.95033	1.41731	.13208
22	35.99648	47.09988	1.17978	2.67016	1.45728	.22167
23	27.73765	34.75351	1.69903	2.60449	1.32114	-.13853
24	42.24377	40.59836	1.13224	3.26538	1.06596	-.04957
25	37.04706	43.99622	2.06539	2.99417	1.24442	-.25071
26	28.24529	39.81041	1.61020	2.45526	1.37622	.40185
27	9.28823	12.59814	1.75788	1.51393	1.23193	.26161
28	3.64471	4.33233	1.89350	.43813	1.69322	-.80266
29	5.68653	12.03977	2.87301	-.08021	2.54792	-.88760
30	2.38759	2.47326	.92572	.04274	1.66238	-.78356
31	3.39588	4.40873	1.51880	.41889	1.38692	.01382
32	4.09353	8.08081	3.11695	.58465	1.17897	.68232
33	5.29471	7.82749	2.42853	1.01406	1.10366	.58083
34	5.76059	6.68669	1.43685	1.16242	1.16033	-.03444
35	4.38471	4.26246	1.01084	1.05064	.95226	.26643
36	3.74765	4.11111	1.40113	.83256	.98969	.47286

표 1.를 살펴보면 섬진강댐의 순별 유입량은 순별로 뚜렷한 주기성을 보인다. 즉 우리나라 강우 특성과 같이 하절기인 18순부터 26순사이의 평균치가 대단히 크다. 또 같은 순도 강우의 유무에 따라 유입량에 큰 차이가 있으므로 표준편차 및 왜곡도 계수가 상당히 큼을 알 수 있다.

3.2 Correlogram에 의한 섬진강댐 순별 유입량의 모형 선정

섬진강댐에 대한 모형을 선정하기 위하여 다음과 같은 절차에 따라 Correlogram을 작성하였으며, 그 결과가 그림 1.에 나타나 있다.

- 1) 각 주기(순)별 자료의 적정 분포형을 검정한다. 본 연구의 경우 K-S Test를 Normal, Log-normal, Gamma분포에 대하여 실시하였으며, 36개 순 모두 Log-Normal 분포에 적합한 것으로 나타났다.
- 2) 정규화 및 표준화. 1)의 결과에 따라 자료의 대수치에 대한 평균과 분산을 구한 후 자료를 정규화, 표준화한다.

3) 정규화 및 표준화된 자료를 이용한 Correlogram 작성. 2)의 결과로 얻어진 자료를 이용하여 Correlation Coefficient를 구한 후 Correlogram을 작성한다.

Correlogram for 10day agricultural demand

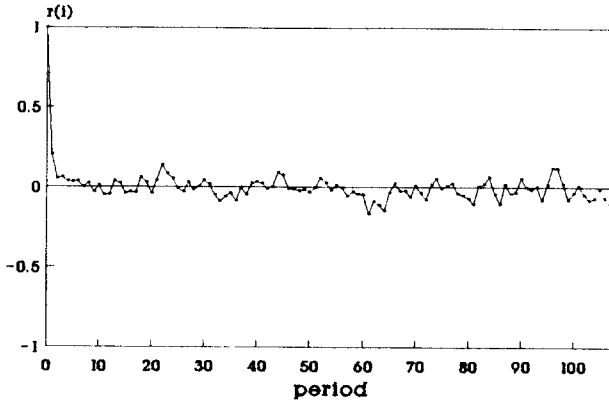


그림 1. 섬진강댐 순별 유입량 자료의 Correlogram

그림 1.을 살펴보면 섬진강댐의 순별 유입량자료의 Correlogram은 주기성을 가지지 않으므로, PARMA(p, q) 모형중 Constant parameter를 가지는 모형을 선택하여 예측에 이용하고자 한다.

3.4 섬진강댐 순별 유입량을 위한 PARMA(p, q) Model

PARMA(p, q) Model의 기본식은

$$Z_t = \sum_{j=1}^p \beta_j Z_{t-j} + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^q \alpha_i \varepsilon_{t-i} \quad \dots\dots\dots (1)$$

와 같으며, AR term의 계수 β_j 는 Yule-Walker 방정식에 따라 구할 수 있고, MA term은 식(2)로 계산된 실측치의 잔차에 의하여 식 (3)-(4)를 이용하여 구할 수 있다. 이때 AR term의 차수 결정은 앞에서 제시한 Correlogram에 따라 2차까지만 고려하기로 하며, 이는 Exact Test[-0.081, 0.078]에서 수문학적 지속성이 4차 까지 있으나 1차에 비하여 나머지 차수의 지속성이 대단히 작기 때문이다.

$$Z'_{t-j} = \beta_1 Z_{t-1} + \beta_2 Z_{t-2} + \beta_3 Z_{t-3} + \dots\dots + \beta_p Z_{t-p} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{C_0}{1 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_q^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\alpha_j = - \left(\frac{C_j}{\sigma_\varepsilon^2} - \alpha_1 \alpha_{j+1} - \alpha_2 \alpha_{j+2} - \dots - \alpha_{q-j} \alpha_q \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

본 연구에서는 PARMA(p, q) Model중 PARMA(1, 0), PARMA(1, 1), PARMA(2, 0), PARMA(2, 1)에 대하여 Parameter를 산정하였으며, 그 결과가 표 2.에 나타나 있다. 표 2.에서 알 수 있는 바와 같이 MA term의 계수와, AR term 중 2차항의 계수가 대단히 작으므로 본 연구에서는 PARMA(p, q) Model

중 PARMA(1, 0) 즉 PAR(1) Model을 채택하기로 하며, 선정된 모형은 다음과 같다.

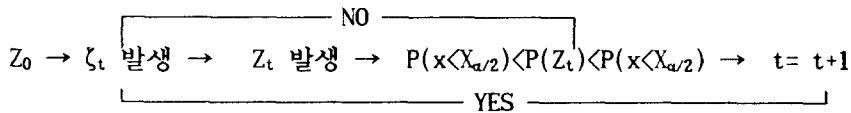
$$Z_t = 0.42395 Z_{t-1} + 0.90569 \zeta_t \quad \dots\dots\dots (5)$$

표 2. PARMA(p,q) Model parameter 산정

계열 구분	S. & N.	AR(1) ERR.	AR(2) ERR.	ARMA	AR PARA.		MA PARA.	SV OF ERR.
					1ST	2ND		
평균	.0000	.0004	-.0004					
분산	.9709	.8793	.8793	(1, 0)	.4240	.0000	.0000	.9057
왜곡도	-.1559	.0348	.0347	(1, 1)	.4240	.0000	-.0003	.8793
Lag-1 CO. C	.4240	.7732	.7732	(2, 0)	.4241	-.0003	.0000	.9056
Lag-2 CO. C	.1794	.0002	.0002	(2, 1)	.4241	-.0004	-.0002	.8793

3.5 섬진강댐 유입량 예측을 위한 제한조건

본 연구에서 선정한 PAR(1) Model은 대수정규분포를 따르는 자료를 발생하는 주기성 모형이다. 따라서 유입량을 발생하는 방법은 식(5)에 따라 Z_t 계열을 발생한 후 각 값을 그 주기의 평균과 분산을 이용하여 Reverse Standardization를 시행한 후, Reverse Normalization하면 된다. 이때 대수정규분포의 특성상 대수치를 다시 환산할 경우 평균과 표준편차가 큰 주기의 경우 상식 밖의 값이 발생하게 되는데, 즉 유입량이 대단히 커서 댐의 Mass-Balance를 초과하는 유입량-, 이를 시정하기 위하여 표준정규분포에서 일정한 유의수준(예 1%, 5%, 10% 등)을 정하여 다음과 같은 방법에 따라 발생한 값이 유의수준을 넘을 경우 그 순의 값을 표준정규난수부터 다시 발생하도록 한다.



$\alpha = 1\%, 5\%, 10\%$ 중 어떤 유의수준을 정할 것인지는 각 유의수준에 따라 Z_t 계열을 발생한 후 이들 계열의 Normality를 K-S Test에 의하여 검정하였으며, 그 결과 5%까지 Normality에 영향이 없는 것으로 나타났으므로 최대 유의수준인 $\alpha=5\%$ 를 채택하기로 한다.

4. 섬진강댐 순별 유입량 자료와 농업용수 수요량의 관계

앞에서 설명한 바와 같이 섬진강댐의 유입량과 농업용수 수요량은 강우에 의하여 많은 영향을 받는다. 본 연구에서는 다음과 같은 이유를 근거로 댐 유입량과 수요량의 관계를 직접 상관관계를 맺지 못하고, 추계학적 모형에 의하여 도출하기로 한다.

- 1) 유입량에 비하여 수요량은 순별 강우량 분포에 큰 영향을 받는다.
- 2) 강우량이 답의 허용침수심을 넘을 경우, 즉 60mm이상의 강우는 댐 유입량에는 큰 영향을 미치나, 농업용수 수요량에는 강우가 60mm 일때와 큰 차이가 없다.
- 3) 따라서 강우량이 농업용수 수요량을 감소시키나, 강우 중분이 일정한 범위를 초과할 경우 농업용수 수요량 감소율에 큰 영향을 미치지 못한다.

4.1 농업용수 수요량의 산정 및 통계 분석

농업용수 수요량은 답의 침투량과 증발산량으로 이루어지며, 강우가 발생할 경우 강우량에 따라 수요량이 변한다. 이중 기상상태에 영향을 받는 증발산 량의 경우는 FAO에서 권장하는 수정 Penman방법에 의하여 구하였고, 침투량은 동지농조의 평균 관측치 4mm/day 채택하였으며, 단위면적당 농업용수 수요량은 아래와 같은 방법으로 구하였다.

$$\text{현침수심} = \text{전일침수심} + \text{강우량} - \text{필요수량}(\text{증발산량} + \text{침투량})$$

(현침수심 < 0 이면, 현침수심 = 0, 현침수심 > 60mm 이면, 현침수심 = 60mm)

이때 현침수심이 "0"보다 작으면 농업용수 수요량이 발생하며 분석기간(1975-1990) 동안의 기상자료를 바탕으로 구한 단위면적당 농업용수 수요량의 통계학적 특성치가 표 3.에 나타나 있다.

표 3. 순별 농업용수 수요량의 통계학적 특성치

단위 : mm/day

주기	산술치			대수치		
	평균	분산	왜곡도계수	평균	분산	왜곡도계수
1	11.231	.879	.837	2.416	.076	.707
2	11.135	1.361	2.110	2.404	.109	1.902
3	11.153	1.042	1.735	2.408	.087	1.517
4	10.567	.955	1.144	2.354	.086	.995
5	11.284	1.531	.767	2.415	.130	.625
6	11.149	2.072	.803	2.396	.175	.690
7	10.634	1.540	.597	2.355	.141	.416
8	10.091	1.354	.473	2.303	.132	.204
9	9.924	1.348	-.075	2.286	.138	-.156
10	9.319	2.415	.274	2.200	.264	-.125
11	9.380	2.211	.323	2.212	.239	-.134
12	9.096	2.826	.379	2.163	.310	.086
13	8.950	2.688	.460	2.149	.306	-.167
14	9.364	2.538	.308	2.202	.275	-.092
15	7.124	1.848	.229	1.931	.266	-.196
16	8.731	2.835	.070	2.112	.357	-.588
17	8.685	3.133	.478	2.099	.373	-.224
18	10.727	3.759	-.275	2.302	.410	-.696
19	10.325	3.351	-.173	2.275	.378	-.862
20	13.649	2.603	-1.103	2.593	.222	-1.285
21	10.769	3.310	.062	2.328	.330	-.451
22	9.802	3.391	.210	2.223	.364	-.253
23	11.009	3.019	.127	2.362	.285	-.232
24	12.002	2.904	-.445	2.454	.267	-.612
25	13.314	2.902	-1.183	2.560	.268	-1.502
26	10.340	3.285	.290	2.288	.320	.050
27	9.494	2.772	.246	2.210	.293	.075
28	9.883	2.074	.595	2.271	.203	.313
29	9.776	2.054	.859	2.261	.198	.535
30	9.685	1.446	.509	2.260	.146	.349
31	11.541	1.767	.647	2.435	.148	.407
32	11.591	1.638	.635	2.441	.137	.444
33	11.533	1.186	-.002	2.440	.104	-.146
34	11.689	1.324	1.270	2.453	.107	.963
35	11.253	1.042	1.233	2.417	.088	1.097
36	11.265	.729	.084	2.420	.065	-.005

표 3.에서 1순 - 12 순과 28순-36순 동안에는 농업용수 수요가 실질적으로 "0"이나 농업용수 수요량 예측 모형을 만들기 위하여 앞에서 제시한 방법에 따라 계산하였다.

4.2 ARX(p, r) Model

유출량을 모의하는 방법 중, 전 시간구간의 유출량 뿐 아니라, 강우를 이용하여 유출량을 모의하는 모형으로 ARX(p, r) Model이 있으며, 이 식의 기본식은 다음과 같다.

$$Y_t = \sum_{j=1}^p \beta_j Y_{t-j} + \sum_{k=0}^r \omega_k Z_{t-k} + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^q \alpha_i \varepsilon_{t-i} \quad \dots\dots\dots (6)$$

여기서 Z는 강우량, ω 는 강우량이 유출량에 미치는 영향을 나타내는 계수이다. 본 연구에서는 ARX(p, r) 모형의 Y_t 를 농업용수 순별 수요량으로 Z_t 를 섬진강댐의 순별 유입량으로 하여 농업용수 수요에 대한 ARX(p, r) 모형을 개발하고자 한다.

4.3 ARX(p, q) Model의 차수 및 Parameter 산정

4.1절에서 설명한 농업용수 수요량의 통계특성치를 이용하여 각 순별 농업용수 수요량에 대한 분포형 검정을 댐 유입량과 같이 3가지 분포형에 대하여 실시한 결과 대수정규분포가 가장 적절한 것으로 나타났다. 따라서 대수정규분포에 의한 정규화 및 표준화를 실시한 후 이로부터

Correlogram
for 10day inflow

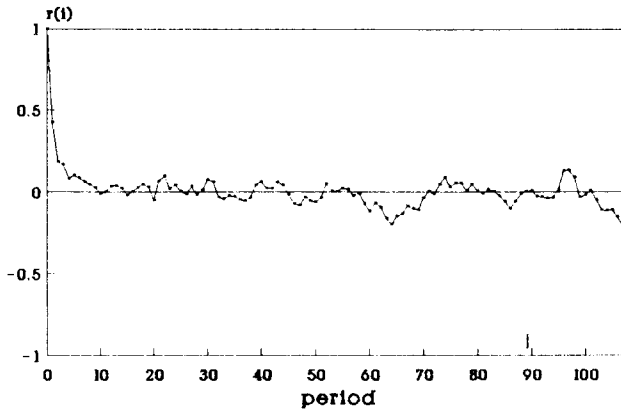


그림 2. 순별 농업용수의 Correlogram

Correlogram
for Cross Correlation Coefficient

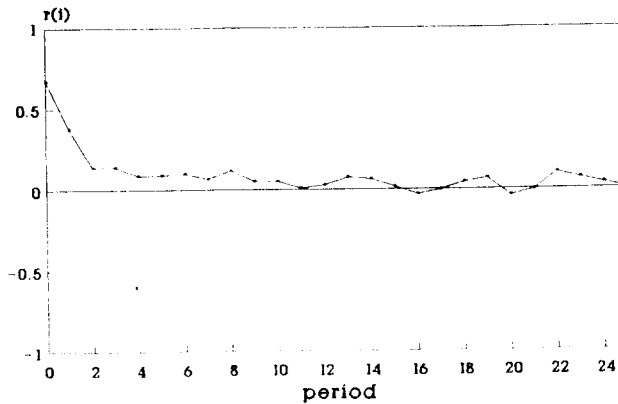


그림 3. 댐유입량과 농업용수 수요량의 Cross-Corelogram

Correlogram을 작성한 결과, 수요량의 경우 Lag-1만이 수문학적 지속성을 가지는 것으로 밝혀졌으므로 수요량 산정을 위한 ARX Model의 차수를 ARX(1,0)으로 하고, 그에 따른 Parameter를 구하기로 한다.

$$Y_t = \beta_1 Y_{t-1} + \omega_1 Z_t + \varepsilon_t \quad \dots\dots\dots(7)$$

ARX(1,0) Model의 parameter β_1 , ω_1 및 표준정규난수의 분산 σ_ε 는 아래의 식에 의하여 구할 수 있다.

$$\beta_1 = \frac{\rho_1 - \gamma_1 \gamma_0}{1 - \gamma_1^2} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\omega_1 = \frac{\gamma_0 - \rho_1 \gamma_1}{1 - \gamma_1^2} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{1 - \beta_1 \rho_1 - \omega_1 \gamma_0} \quad \dots\dots\dots(10)$$

여기서 ρ_k : 농업용수 수요량의 Lag-k Correlation Coefficient
 γ_k : 댐유입량과 수요량의 Lag-k Cross Correlation Coefficient

식(8)-식(10)으로 부터 ARX(1,0) Model의 parameter를 구한 결과

$$Y_t = -0.09360 Y_{t-1} + 0.69538 Z_t + 0.74297 \zeta_t \quad \dots\dots\dots(11)$$

5. PAR(1) Model 과 ARX(1,0) Model의 적합성 판정

PAR(p) Model 과 ARX(p,r) Model의 적합성 판정에 대한 기준은 특별히 없다. 따라서 본 연구에서는 식(5)와 식(11)에 의하여 발생하는 Z_t , Y_t 의 Normality와 Correlogram을 계산하여, 기왕의 자료와 비교하기로 한다. 먼저 댐유입량 자료는 3.5절에서 밝힌 바와 같이 정규분포를 따르는 것으로 나타났으며, 농업용수 수요량도 정규분포를 따르는 것으로 나타났다. 또한 모의된 댐유입량과 수요량자료의 Correlation Coefficient를 비교하면 표 4.와 같으며, 표 4.에서 모의된 자료는 기왕의 자료와 비슷한 결과를 보임을 알 수 있다.

6. 결 론

이상에서 살펴본 바와 같이 수자원 시스템의 최적화를 연구하는데 있어서 시스템의 변수들 사이에는 어떤 관계를 가진 변수들이 있으며, 이 관계를 밝힘으로 시스템 최적화의 신뢰도를 더욱 높일 수 있다. 본 연구에서는 댐 운영의 최적화에 이용되는 변수중 댐유입량과 하류의 용수수요량중 농업용수 수요량의 관계를 추계학적 모형에 의하여 도출하였으며 결론은 다음과 같다.

- 1) 주기성을 가지는 순별 댐유입량은 PAR(p) Model with constant parameter를 이용하여 예측할 수 있다.
- 2) 강우 및 기상상태에 영향을 받는 농업용수 수요량은 강우에 영향을 받는 댐유입량 자료와의 상관관계(Cross Correlation Coefficient)를 이용하여 ARX(p,r) Model로 예측할 수 있다.
- 3) 댐유입량과 수요량을 상관관계를 이용하여 예측함으로써 신뢰도 높은 댐 운영방법을 개발할 수 있을 것이다.

표 4. 모의된 자료의 Correlation Coefficient

Lag	관측, 계산 자료의 Correlation Coeff.				모의 발생 자료의 Correlation Coeff.			
	댐유입량	수요량	Cross based inflow	Cross based demand	댐유입량	수요량	Cross based inflow	Cross based demand
0			.67173	.67173			.55731	.55731
1	.42917	.20423	.14813	.38050	.31824	.18523	.14150	.24149
2	.18424	.05120	-.01166	.14238	.07279	.03922	.06782	.07436
3	.16961	.06045	.05953	.14133	.02309	.02935	.02991	.01773
4	.08412	.03791	-.00738	.08748	.01996	-.05572	.00519	-.03016
5	.10227	.03394	-.01125	.08952	.03667	-.00515	.02606	-.02123
6	.08754	.03626	.00419	.10078	.01830	.01485	.01657	.00352
7	.06190	.00176	-.03914	.06757	.04614	.02981	.03688	.04782
8	.04862	.02429	-.02001	.11997	.02907	.01466	.01873	.03832
9	.02878	-.03171	-.01403	.05156	.02621	.02653	.01223	.04168
10	-.01107	.01060	-.04648	.05118	.02855	.03551	.01095	.05817
11	-.00061	-.05005	-.03595	.00969	.00739	-.00272	.00405	.02454
12	.03686	-.04546	-.01212	.02967	.01083	.02111	.02869	-.00553
13	.03958	.03467	.04779	.07691	.03282	.04737	.03101	.03032
14	.02644	.02376	.04605	.06563	.01142	-.00180	.01354	.02294
15	-.02011	-.03881	.00899	.01753	.02675	.00075	-.01006	.00703
16	.00114	-.02922	.02799	-.03103	-.01388	-.01690	.00017	-.01427
17	.02923	-.03585	.04124	-.00120	-.00619	.01403	-.02529	.03062
18	.04897	.05901	.04956	.04311	-.01514	.02125	-.02170	.04819
19	.03304	.02988	.02347	.06694	.01176	.04054	.01064	.02009
20	-.04986	-.03860	.00023	-.03654	.01593	.00685	.01376	.02769
21	.06626	.03895	.11915	-.00289	.02681	-.00968	.01228	.01997
22	.09880	.13844	.09490	.10456	-.00916	-.00500	.01784	-.02902
23	.02184	.08406	.01732	.06858	.02340	.04611	.05456	.00553
24	.04308	.05239	.02111	.03553	.04319	-.01452	-.00569	.02970
25	.00342	-.01103	.02245	.00427	.03791	.02824	-.00244	.05585

<참고문헌>

1. 섬진강 다목적댐 관리년보, 한국수자원공사
2. 기상년보, 중앙시강청
3. 공업수문학, 윤용남, 청문각
4. Applied Modeling of Hydrologic Time Series, J.D. Salas, J.W.Delleur, V. Yevjevich, and W.L. Lane, WATER RESOURCES PUBLICATIONS
5. "Real-Time Operation of Tanshui River Reservoir", Jan-Tai Kuo, Nien-sheng Hsu, Wen-sen Chu, ASCE, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol 116, No. 3, 1990
6. 소비수량산정방법 실용화 연구, 농업진흥공사, 1989.12