榮山湖 運營을 위한 洪水豫報模型의 開發(I)

-羅州地點의 洪水流出 推定 -

River Flow Forecasting Model for the Youngsan Estuary Reservoir Operations(I)

-Estimating Runoff Hydrographs at Naju Station -

朴 昌 彦*·朴 承 禹**
Park, Chang Eon ·Park, Seung Woo

Summary

The series of the papers consist of three parts to describe the development, calibration, and applications of the flood forecasting models for the Youngsan Estuarine Dam located at the mouth of the Youngsan river. And this paper discusses the hydrologic model for inflow simulation at Naju station, which constitutes 64 percent of the drainage basin of 3521.6km^2 in area. A simplified TANK model was formulated to simulate hourly runoff from rainfall. And the model parameters were optimized using historical storm data, and validated with the records.

The results of this paper were summarized as follows.

1. The simplified TANK model was formulated to conceptualize the hourly rainfall-runoff relationships at a watershed with four tanks in series having five runoff outlets. The runoff from each outlet was assumed to be proportional to the storage exceeding a threshold value. And each tank was linked with a drainage hole from the upper one.

2. Fifteen storm events from four year records from 1984 to 1987 were selected for this study. They varied from 81 to 289mm. The watershed averaged, hourly rainfall data were determined from those at fifteen raingaging stations using a Thiessen method. Some missing and unrealistic records at a few stations were estimated or replaced with the values determined using a reciprocal distance square method from abjacent ones.

3. An univariate scheme was adopted to calibrate the model parameters using histori-

* (財)生産工學研究所
** 서울大學校 農業生命科學大學

키워드 : 홍수예경보, 홍수예보모형, TANK모형

cal records. Some of the calibrated parameters were statistically related to antecedent precipitation. And the model simulated the streamflow close to the observed, with the mean coefficient of determination of 0.94 for all storm events.

4. The simulated streamflow were in good agreement with the historical records for ungaged condition simulation runs. The mean coefficient of determination for the runs was 0.93, nearly the same as calibration runs. This may indicates that the model performs very well in flood forecasting situations for the watershed.

I. 緖 論

洪水豫警報시스템은 降雨量이나 流域의 水位 또는 流量을 관측하고, 관측된 자료로 부터 豫想洪水를 報告하고 警報를 함으로써 洪水로 인한 被害를 最少化할 수 있도록 하는 것이다. 즉, 洪水의 規模나 發生時期를 豫測하여 事前에 水防對策을 수립함으로서 洪水로 인해 발생할 수 있는 被害를 감소시키기 위한 것이다.[2)]

1974년 우리나라에서 처음으로 개소된 漢江洪水統制所를 비롯한 5개소의 洪水豫警報시스템에서는 豫測 또는 觀測된 降雨資料로 부터 洪水流出模型을 적용하여 洪水豫報를 실시하고 있으며, 洪水流出模型으로는 貯溜函數法을 적용하고 있다. 貯溜函數法은 媒介變數가 적어 洪水流出 計算方法이 비교적 간단한 模型이나, 對象地域이 크고 복합적인 地相特性을 갖는 경우에는 媒介變數의 限界가 있어 洪水流出 計算結果의 精度가 떨어지는 問題點이 있다.[2)]

본 硏究의 對象流域인 榮山江流域은 하구둑이 설치되어 潮汐에 따라 排水閘門을 통하여 洪水를 조절하고 있다. 排水閘門이 열려있을 때는 淡水湖의 內水位와 潮汐에 따라 放流量이 결정되며, 排水閘門이 닫혀있을 때는 背水現象이 발생되므로, 洪水流出의 推定을 위해서는 貯溜函數法과 같은 단순한 洪水量 計算方法으로는 河川流量의 시간적 변화나 淡水湖의 水位變化를 정확하게 표시할 수 없으므로 적절한 洪水追跡方法의 導入이 필요하다.[4)]

본 硏究의 目的은 榮山湖의 洪水豫警報를 위한 프로그램을 開發하고 그 適用性을 검토하여, 洪水狀況에서 實時間 豫報를 비롯한 효율적인 榮山湖 運營 및 관리가 이루어 질 수 있도록 하는데 있다. 이를 위하여, 榮山湖로의 流入量의 推定을 위해 羅州支點의 雨量-流出模型과 羅州支點下流의 각 支川 및 隣接地域의 洪水推定模型을 구성하였고, 洪水發生時 淡水湖의 時間別 流入量과 排水閘門 放流量을 推定하여 淡水湖 水位變化를 豫測할 수 있는 模型을 開發하고, 榮山湖의 時間的 空間的 水位 및 流量變化를 推定할 수 있도록 一次元水理學的 洪水追跡模型을 開發하여, 이들 模型들을 接合하여 洪水豫報模型으로 構成하고 그 應用性을 분석하였다.

본 報에서는 洪水豫報模型에서 計測支點인 羅州支點에서의 洪水流出을 추정하기 위하여 선정된 TANK模型의 構成 및 適用結果를 분석하였다. 第2, 第3에서는 未計測支點인 羅州下流流域에서의 洪水流出模型, 水理學的 洪水追跡模型, 淡水湖 內水位計算模型 각각의 應用 및 適用結果에 대하여 詳述할 예정이다.

II. 模型의 構成

1. TANK模型

洪水豫警報에 가장 적절한 洪水流出模型을

選定하기 위해서는 그 模型에서의 媒介變數의 構成과 필요한 人力資料, 模型結果의 正確性 등이 고려되어야 한다. 模型의 利用에 필요한 人力資料는 정밀한 現場調査 없이도 구득이 가능하여야 하며, 實時間으로 模型이 구동되므로 제한된 시간내에 계산이 수행 될 수 있어야만 할 것이다.[4] 물론, 이러한 條件들은 一定程度의 模型의 正確性과 對象流域에의 適用性이 전제되어야 한다.

洪水豫警報를 위한 洪水流出模型의 條件들을 고려하여, 計測流域인 羅州流域의 洪水流出 水文曲線의 推定을 위해 TANK模型을 選定하였다. 時間別 流出量 觀測資料가 존재하는 計測支點에서의 流出量 推定을 위하여 선정된 TANK模型은, 1956년 Sugawara에 의하여 河川流出을 분석하기 위해 物理的 類似模型 즉, 線形貯水池로 된 概念的 單純模型으로 개발되었는데, 이 방법은 日本에서 매우 널리 사용되고 있다. 우리나라에서도 최근에 金과 朴(1988)[3]에 의하여 日流出量 計算을 위하여 여러지구에 적용되어 그 적용성을 인정받은 바 있다.

2. TANK 模型

본 硏究에서는 TANK模型을 일반적으로 大流域에 사용되는 4단TANK의 형태로 構成하였으며, 時間別로 流出量을 계산하는 관계로 기존의 日流出量 계산시의 각 TANK의 特性과는 다소 차이는 있겠으나 計算方法은 동일하게 하고, 蒸發散量의 영향을 무시하여 TANK의 構造를 Fig.1과 같이 하였다. 특히, 1단TANK의 경우는 流出孔을 두지않고 排水孔만 있는 것으로 하여 流出의 遲滯時間을 고려하였으며, 2단TANK와 3단TANK는 2개의 流出孔이 있는 반면, 4단TANK에는 1개의 流出孔만이 있는 것으로 構成하였는데, 각 TANK의 流出孔의 特性에 대하여는 模型의 적용을 통하여 규명하였다.

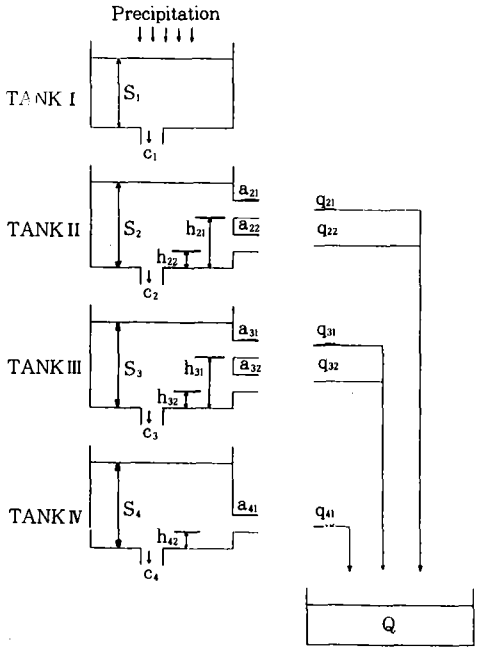

Fig. 1. Schematic diagram of the TANK model

3. TANK의 貯溜量變化

Fig.1의 TANK模型에서 각 TANK의 貯溜量은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{i,t}=S_{i,t-1}+U_{i,t}-q_{i,t}-D_{i,t} \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서, $S_{i,t}$=t시간의 i Tank의 貯溜量, $S_{i,t-1}$=t−1시간의 貯溜量, $U_{i,t}$=t시간의 降雨量 또는 i−1 Tank로 부터의 流入量, $q_{i,t}$=t시간의 流出量, $D_{i,t}$ =i+1 Tank 또는 저류권역 이하로의 排水量이다.

각 流出孔으로 부터의 流出量과 排水量은 貯溜量−流出量의 관계로 부터 다음과 같이 정의된다.

$$q_{ij}=a_{ij}(S_i-h_{ij}) \quad \text{if}, S_i<h_{ij} \quad \cdots\cdots (2)$$

$$q_{ij}=0 \quad \text{if}, S_i \le h_{ij} \quad \cdots\cdots (3)$$

$$D_i=b_i \cdot S_i \quad \cdots\cdots (4)$$

여기서, q_{ij} =i tank의 j流出孔의 流出量, a_{ij} =流出孔의 貯溜係數, S_i =i Tank의 貯溜量, h_{ij} =流出孔의 높이 등이다.

4. 模型의 構成

時間別로 計測流域에서의 洪水流出量을 계산하도록 構成되어진 TANK模型의 計算過程은 Fig.2와 같으며, 그 內容은 다음과 같다.

① 模型의 媒介變數, 初期貯溜量, 流域面積, 時降雨量 資料 등 入力資料를 읽는다.

② 初期貯溜量으로 부터 각 Tank별 流出量과 排水量을 계산한다.

③ 각 Tank별 流出量을 합산하여 그 시간의 流出量으로 계산한다.

④ 1단 Tank는 時降雨量 資料를, 2단 이하의 Tank는 그 上部Tank의 排水量을 고려하여 각 Tank별 貯溜量을 계산한다.

⑤ 각 Tank별 貯溜量을 初期貯溜量으로 하고, ②~④의 計算過程을 반복하여 計算時間동안의 時流山量을 계산한다.

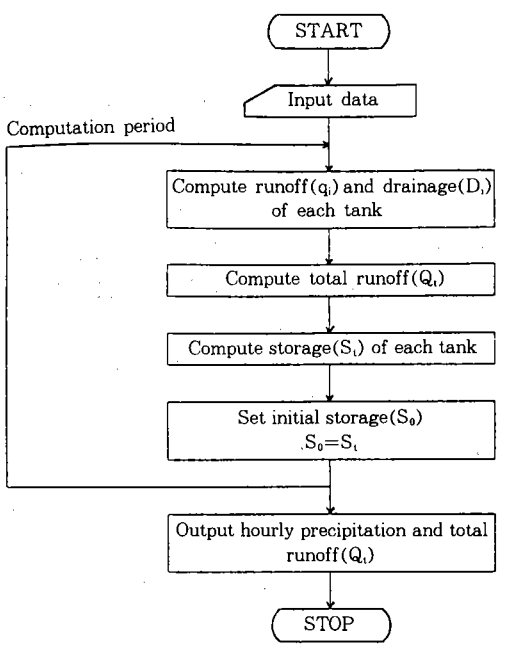

Fig. 2. Flow chart of the TANK model

Ⅲ. 模型의 應用

1. 降雨入力資料의 構成

본 硏究의 對象地域인 榮山江流域은 Fig.3과 같이 1982년에 완공된 하구둑지점을 말단으로 하는 流域面積 3521.6km^2, 流路延長 약 142.7km인 유역으로, 水位觀測所 11개소, 雨量觀測所 9개소가 분포되어 있다. 그림에서, 背水現象의 영향이 미칠 것으로 예상되는 最上流 地點을 하구둑으로 부터 약 63km 상류에 위치한 羅州 水位觀測所 地點으로 가정하여, 그 下流로는 水理學的 洪水追跡을 실시하고, 上流地域은 TANK模型을 적용하기로 하여 洪水流出을 推定하기로 하였다.

TANK模型이 적용되어질 流域面積 2058.7 km^{2}의 羅州地域에 대하여, 隣近의 6개 雨量觀測所를 포함한 15개 雨量觀測所의 時間別 降雨量 資料를 1983년부터 1989년까지의 기간에 대하여 수집하여 RDS(Reciprocal Distance Squared)方法에 의해 缺測値 보완을 실시하였으며[3], 同一期間에 대한 羅州 水位觀測所의 水位 觀測資料가 존재하는 降雨資料에 대하여 본 硏究를 위한 降雨事象으로 선정하였다. Table-1은 선정된 降雨事象을 정리하였는데, 1984년부터 1987년까지의 降雨事象 15개였으며 총강우량은 71.1mm~286.1mm 범위를 보였다.

Table-1의 각 降雨事象에 대하여 面積雨量을 계산하기 위하여 Thiessen網으로부터 雨量觀測所別 支配面積을 계산하였으며[4], 각 降雨事象의 總降雨量과 3日 先行降雨量을 기준으로 模型의 媒介變數 補正에 사용할 降雨資料와 檢證에 사용할 降雨資料를 분류하였다.

2. 媒介變數의 補正

가. 最適化技法

媒介變數의 補正을 위하여 最適化技法을 사용하였는데, 사용하기 쉽고 간단한 單一變化法(univariate method)[6]을 이용하였다. 單一

變化法은 각 변수들의 초기값으로부터 1單位씩 변화시켜서 RMS誤差의 제곱을 極少로 하는 變數의 變化値만을 인정하며, 이를 초기값으로 하여 계속 반복함으로써 일정한 收斂程까지 계산하여 最適變數값을 찾아내는 방법이다. 이 방법은 計算時間이 다소 오래 걸리고 초기값에 의해 最適값이 차이를 보일 수는 있으나 收斂限界를 조절하고 여러 값의 초기값에 대하여 계산을 반복함으로써 이 短點을 解消하도록 하였다. 특히, 각각의 最適값 계산에 있어 초기값을 일정하게 함으로써 一定範圍내의 最適變數를 誘導할 수 있어 媒介變數 補正에는 유리할 것으로 판단되었다.

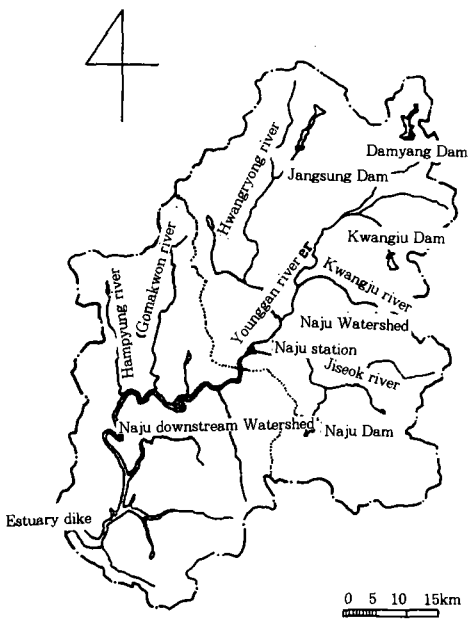

Fig. 3. Sketch of the Youngsan river watershed

나. 媒介變數의 補正

각 降雨事象에 대한 媒介變數의 最適値를 참고하여 媒介變數 補正에 이용한 8개 降雨事象에 대하여 유역의 媒介變數 代表値를 찾아내는 작업을 실시하였다. 우선 tank의 初期貯溜深인 S_1~S_4는 무시하고 나머지 14개 媒介變數別로 8개 降雨事象에 대하여 變移係數를 산정하여 가장 적은 變移係數를 보인 媒介變數를 하나씩 선정해 나가는 방법으로 진행하였다.

Table-1. Selection of precipitaion events

Precipitation events	Period	Areal precipitation (mm)	5-days ante. precipitation R_5 (mm)	3-days ante. precipitation R_3 (mm)	Remarks
TP13	1984. 7. 4~7.10	179.6	8.0	8.0	cal.
TP14	1984. 7.10~7.16	97.4	145.5	20.9	val.
TP16	1984. 9. 2~9. 6	140.1	46.2	44.9	cal.
TP21	1985. 6.22~6.26	233.6	3.8	1.7	cal.
TP22	1985. 6.26~6.29	71.1	244.4	241.9	cal.
TP27	1985. 8. 9~8.13	107.9	0.0	0.0	val.
TP29	1985. 9. 1~9. 6	93.8	0.2	0.2	cal.
TP20	1985. 9.18~9.24	157.9	9.4	9.3	val.
TP32	1986. 6.22~6.28	203.4	0.0	0.0	cal.
TP33	1986. 8.27~9. 1	140.9	0.0	0.0	val.
TP35	1986. 9.19~9.25	111.3	0.0	0.0	cal.
TP43	1987. 7.11~7.18	286.1	5.8	0.0	val.
TP44	1987. 8.16~8.20	81.6	0.6	0.6	val.
TP45	1987. 8.21~8.27	97.2	96.4	4.4	cal.
TP46	1987. 8.28~9. 3	88.6	24.4	7.8	val.

Table-2는 補正段階에 따른 媒介變數의 流域 代表値를 나타낸 것으로서 b_{21} 變數가 8개 降雨事象에 대하여 變移가 제일 적어 첫번째로 선정되었으며, c_4변수가 가장 나중에 0.0004로 선정되었다.

각 tank의 初期貯溜深 S_1~ S_4는 다른 媒介變數가 선정된 후 單一變化法에 의해 最適値를 선정한 다음, 5日先行降雨量(R_5), 3日 先行降雨量(R_3)에 대한 回歸分析을 실시하였다. 回歸分析結果, S_1, S_2는 최적값이 0으로 나타났으며, S_3, S_4는 log函數로서 나타낼 수 있었는데 5日先行降雨量에 대해서 보다 3日先行降雨量에 대해서 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 回歸分析結果 얻어진 回歸方程式은 S_4와 S_3에 대하여 식(5), 식(6)과 같았다.

$$S_4 = 54.2477 \log(10R_3) + 41.9110 \quad \cdots\cdots (5)$$

$$S_3 = 9.4910 \log(10R_3) - 1.1461 \quad \cdots\cdots (6)$$

여기서, R_3 =3日先行降雨量(mm)이며, R_3 =0일 경우는 R_3 =1인 값을 대입하여 정의하도록 하였다.

Table-2와 같은 媒介變數의 補正은 여러가지 초기값에 대하여 실시하였으며 그중 計算値와 觀測値에 대한 決定係數와 RMS誤差를 비교하여 최적값을 선정하였다. 선정된 媒介變數에 대하여 보정에 사용된 8개 降雨事象에 대한 觀測値와 計算値의 比較結果는 Table-3과 같으며, TP13의 경우가 決定係數 0.85로서 가장 낮게 나타났으나 전체적으로 計算結果가 觀測資料와 잘 一致 하는 것으로 판단되었다. 첨두유량 발생시간의 차이는 −2~4시간으로 나타났으며, 첨두유량의 차이는 관측

Table-2. Optimal parameter values calibrated by TANK model

Calibration order	Parameters	Optimum values	Variation coefficient
1	h_{21}	49.9833	0.068
2	a_{32}	0.0208	0.183
3	h_{31}	30.4650	0.244
4	a_{31}	0.0817	0.355
5	a_{22}	0.0100	0.000
6	a_{21}	0.0395	0.140
7	c_1	0.2265	0.208
8	c_3	0.0233	0.476
9	h_{32}	16.3588	0.291
10	h_{22}	23.0814	0.536
11	c_2	0.0927	0.559
12	a_{41}	0.0016	0.997
13	h_{41}	19.1640	0.999
14	c_4	0.0004	1.900

Table-3. Results of TANK model calibration

Events	R^2	RMS error (m^3/s)	Dif. of time to peak(hr)	Peak rate(m^3/sec)			Total runoff(mm)		
				Obser. A	Simul. B	(A-B) /A	Obser. A	Simul. B	B/A
TP13	0.85	112.4	−1	1436.9	1579.6	−0.10	118.4	125.1	1.06
TP16	0.99	69.4	0	1426.4	1536.2	−0.08	95.1	109.6	1.15
TP21	0.96	123.3	−1	2254.2	2539.7	−0.13	151.5	165.4	1.09
TP22	0.93	106.5	2	1220.1	864.3	0.29	67.5	63.5	0.94
TP29	0.95	49.4	0	1112.4	715.9	0.36	55.4	44.8	0.81
TP32	0.97	91.3	−2	2493.8	2329.3	0.07	137.7	119.5	0.87
TP35	0.95	54.9	−2	869.8	1136.4	−0.31	55.5	58.4	1.05
TP45	0.90	31.2	4	752.1	602.0	0.20	61.9	61.8	1.00
Mean	0.94	79.8	0			0.04			0.12
St. dev.	0.04	33.4	2			0.23			

치에 대한 비율이 −0.31～0.36의 범위를 보였다. 또한, 計算値와 觀測値의 總流出量의 比는 0.81～1.15의 범위를 보였다. Fig.4는 決定係數가 0.99로서 가장 높은 TP16 降雨事象에 대한 비교결과이다.

3. 模型의 檢定

選定되어진 流域의 媒介變數 代表値를 이용하여, 媒介變數 補正시 사용되지 않았던 7개 降雨事象에 대하여 水文曲線을 計算하여 觀測資料와 比較하였다. Table-4는 計算値의 比較結果인데, 決定係數는 0.90～0.94의 範圍로서 平均 0.93였으며, 첨두유량 발생시간은 −4～4시간, 첨두유량 차이의 관측치에 대한 비는 −0.17～0.33, 또한 총유출량의 비는 0.91～1.12의 範圍로서 平均 1.05로 計算値가 다소 크게 나타났다. 以上의 結果는 媒介變數 補正에 使用된 8개 豪雨事象에 대한 比較結果와 비슷한 結果를 보여 選定된 媒介變數가 流域을 代表할 수 있는 것으로 判斷되었다. Fig.5는 決定係數가 0.94로서 가장 높은 TP20 降雨事象에 대한 비교결과이다.

IV. 結　論

榮山湖의 洪水豫警報와 排水閘門의 操作 및 運用을 위하여 洪水豫報模型을 개발하였으며, 計測地點인 羅州地點에서의 洪水推定을 위하

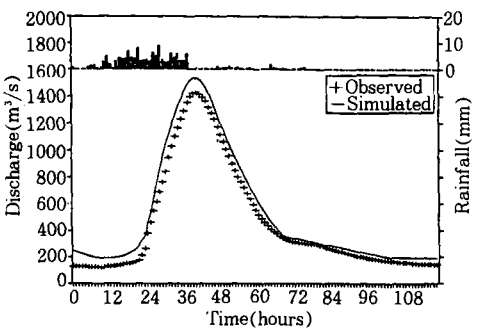

Fig. 4.Observed and simulated hydrographs by the model calibration(1984.9.2～9.6)

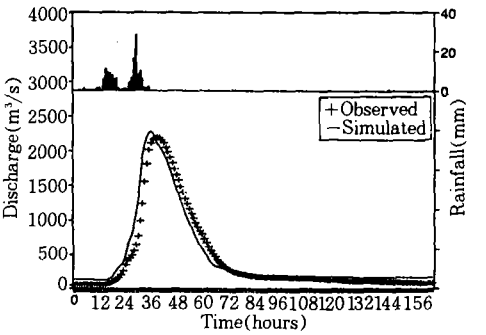

Fig. 5. Observed and simulated hydrographs by the model verification(1985.9.18～9.24)

Table-4. Results of TANK model verification

Events	R^2	RMS error (m^3/s)	Dif. of time to peak(hr)	Peak rate(m^3/sec) Obser. A	Simul. B	(A-B) /A	Total runoff(mm) Obser. A	Simul. B	B/A
TP14	0.94	80.1	0	1220.1	819.6	0.33	83.9	77.0	0.92
TP27	0.93	53.5	0	926.2	1080.6	−0.17	45.3	48.3	1.07
TP20	0.94	96.3	−3	2186.4	2263.5	−0.04	124.0	133.0	1.07
TP33	0.92	80.8	4	1495.7	1534.5	−0.03	66.4	81.9	1.23
TP43	0.94	79.8	−1	2166.2	2071.1	0.04	144.2	163.2	1.13
TP44	0.90	46.5	−4	657.6	712.4	−0.08	49.1	44.8	0.91
Mean	0.93	48.8	2	889.7	649.6	0.27	61.0	62.1	1.02
St.dev.	0.93	69.4	0			0.05			1.05
	0.01	19.5	3			0.19			0.11

여 TANK模型을 구성하여, 그 적용성을 분석한 결과를 要約하면 다음과 같다.

1. 羅州地點의 洪水流出 水文曲線을 계산하기 위하여, 槪念的 單純模型인 TANK模型을 선정하여, 4개의 tank와 5개의 流出孔으로 구성하고 降雨에 대한 時間別 流出量을 推定할 수 있도록 하였다.

2. 15개 雨量觀測所의 時雨量 자료를 수집하고 逆距離乘(RDS)法으로 缺測値를 보완하여 模型의 適用性 分析을 위한 15개 降雨事象을 선정하였다.

3. 單一變化法에 의하여 TANK模型의 媒介變數 補正을 실시한 결과, 計算値가 觀測値와 잘 일치되어 決定係數가 平均 0.94로 나타났다.

4. 媒介變數 補正結果 選定되어진 流域의 代表値를 이용하여 TANK模型의 檢證을 실시한 결과, 決定係數가 平均 0.93으로서 媒介變數 補正時 결과와 비슷한 결과를 보여 模型의 適用性이 높은 것으로 판단되었다.

參 考 文 獻

1. 角屋 睦, 田中丸治哉, 永井明博, 金口井幸, 1989, 愛知川上流域에서의 長短期流出兩用模型의 適用과 實時間洪水豫測, 일본 수자원연구센타－연구보고서.

2. 建設部, 漢江洪水統制所, 1991, 榮山江洪水豫警報 프로그램 開發 最終報告書.

3. 金顯榮, 朴承禹, 1988, 灌漑用貯水池의 日別流入量과 放流量의 模擬發生, 韓國農工學會誌, 30(1), pp.50～62.

4. 朴昌彦, 1994, 榮山湖 運營을 위한 洪水豫報模型의 開發, 서울大學校 大學院 博士學位 論文.

5. Franchini, Marco and Michele Pacciani, 1991, Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models, J. of Hydrology, Vol. 122, pp.161-219

6. Rao, S. S., 1978, Optimization Theory and Applications, Wiley Eastern Limited, pp.257～260.

7. WMO, 1987, Real-Time Intercomparison of Hydrological Models, Technical Reports to the Commission for Hydrology No.23.