

基底流出量推定을 위한 降雨 遲延反應模型 開發

Development of Rainfall-Delayed Response Model for the Calculation of Baseflow Proportion

洪 鍾 震*· 崔 禮 煥**
Hong, Chong Jin · Choi, Ye Hwan

Summary

The Purpose of this study is to develop the rainfall-delayed response model (RDR Model) which influences the baseflow proportion of rivers as a result of the antecedent precipitation of the previous several months.

The assesment of accurate baseflows in the rivers is one of the most important elements for the planning of seasonal water supply for agriculture, water resources development, hydrological studies for the availability of water and design criteria for various irrigation facilities.

The Pulukan river gauging site which is located in the Pulukan catchment on Bali Island, Indonesia was selected to develop this model.

The basic data which has been used comprises the available historic flow records at 19 hydrologic gauging stations and 77 rainfall stations on Bali Island in the study.

The methology adopted for the derivation of the RDR model was the water balance equation which is commonly used for any natural catchment ie, $P=R+(\text{catchment losses})=R+(ET+DP+DSM+DGW)$.

The catchment losses consist of evapotranspiration, deep percolation, change in soil moisture, and change in groundwater storage.

The catchment areal rainfall has been generated by applying the combination method of Thiessen polygon and Isohyetal lines in the studies.

The results obtained from the studies may be summarized as follows :

1. The rainfall-runoff relationship derived from the water balance equation is as shown below, assuming a relationship of the form $Y=AX+B$. Finally these two equations for the annual runoff were derived :

$$ARO_1=0.855 ARF-821, ARF \geq 1,400 \text{ mm}$$

$$ARO_2=0.290 ARF-33, ARF < 1,400 \text{ mm}$$

2. It was found that the correction of observed precipitation by a combination of Thiessen polygons and Isohyetal lines gave good correlation.
3. Analysis of historic flow data and rainfall, shows that surface runoff and base flow are 52 % and 48 % (equivalent to 59.4 mm) of the annual runoff, respectively.
4. Among the eight trial RDR models run, Model C provided the correlation with historic flow data. The number of months over which baseflow is distributed and

*農業振興公社 干拓部

**江原大學校 農科大學

the relative proportions of rainfall contributing in each month, were estimated by performing several trial runs using data for the Pulukan catchment. These resulted in a value for N of 4 months with contributing proportions of 0.45, 0.50, 0.03 and 0.02. Thus the baseflow in any month is given by :

$$P_{1(n)} = 0.45 P_{(n)} + 0.50 P_{(n-1)} + 0.03 P_{(n-2)} + 0.02 P_{(n-3)}$$

5. The RDR model test gave estimated flows within +3.4% and -1.0% of the observed flows.
 6. In the case of 3 consecutive no rain months, it was verified that 2.8% of the dependable annual flow will be carried over the following year and 5.8% of the potential annual baseflow will be transferred to the next year as a result of the rainfall-delayed response.
- The results of evaluating the performance of the RDR Model was generally satisfactory.

I. 序 論

本 研究의 對象은 印尼國 Bali 섬내 流域으로서 사용된 水文 資料는 77個 降雨 觀測所의 31個年 (1948~1978)의 降雨 記錄值^{3,8)}, 19個 水位觀測 地點^{1,9)}의 觀測記錄과 Negara 氣象台의 氣象 觀測 資料가 사용되었다.

本 研究에서 檢討된 主要內容은 Thessen Polygon과 Isohyetal Lines Method의 組合方法에 依한 降雨分析, 流量方程式의 誘導, Annual Rainfall-Runoff Relationships 誘導, Surface Runoff와 Base Flow의 分離, 流域內에서의 蒸發散量推定 等이며, 이들 資料를 利用한 基底流出量 推定을 爲한 模型 開發에서 流域內의 先行降雨量이 河川의 Baseflow에 如何히 影響을 주고 있는지를 Model函數에 추출 및 檢定을 통하여 任意地點에서 基底流出量을 推定하는데 應用하고자 하는데 그 目的을 두었다.

實測 流量資料가 短期間 밖에 없는 Bali Pulukan 水文地點에 降雨遲延反應模型(Rainfall-Delayed Response Model, RDR)¹⁰⁾을 導入하여 理論的 展開과 綜合結論을 얻어 基底流出量 推定을 試圖한 것이다. 또한 熱帶地域 山間 流域에서의 流出 模型 誘導를 爲하여 Mock⁷⁾ (1973)는 Indonesia Java 섬內에서 流域規模 13~4, 200km² 範圍內에 있는 71個水文地點에서 觀測한 流量觀測資料와 蒸發散量 記錄을 利用分析한 流出 Model에 依해서 熱帶地域(Tropical Area)에서 Groundwater Storage와 流出分布를 解析한 바 있으며, 國內에

서는 崔¹⁰⁾ (1982)가 우리나라 小流域인 半月의 2個流域과 Netherlands의 Hupselse 小流域을 中心으로 Nash Model과 J-Model로서 任意 降雨量으로 부터 流出量 推定에 對한 考察을 하고 適用可能性을 判定하였으며, 金⁶⁾ (1983)은 韓國河川의 月 流出量 推定을 爲해 降雨量, 蒸發散量, 土壤水分 變化量을 單純化하고 流域降雨量, 計器蒸發量, 前期流出量을 變數로 하는 地域化 回歸 Model을 誘導하였다.

本 RDR Model은 東南 亞細亞國의 農業用水 開發을 爲한 技術用役事業의 水文分野 業務에 10餘年間 從事하면서 現地 實測 資料에 依하여 開發한 Model로서, 世界開發銀行 (IBRD)과 亞細亞開發銀行 (ADB) 管理事業地區의 水利構造物設計 基準設定에 RDR Model 運營 結果值들이 利用되었으며 이들 事業은 이미 完工되어 現在 Project Benefit Monitoring Evaluation, PBME 事業으로 繼續 施行되고 있다는데 그 意義가 더 있다고 하겠다.

II. 基本理論

河川의 流出量은 流域內의 여러가지 因子들에 依한 影響을 받는데 一般的으로 降雨量의 多少, 流域內에서의 蒸發散量 (Evapotranspiration) 氣象因子 (Climatic Factor), 土壤性質 (Soil Characteristics), 流域被覆狀態 (Vegetation on the Catchment), 流域形狀 (Catchment Shape), 地形地質學的因子 (Geomorphologic Feature)等에 主要因이 된다고 할 수 있다.

本 研究에서는 이러한 概念을 基礎로 물收支 基本理論을 導入하여 年間 月別 流出量중 基底量의 分布率을 구하였다.

1. 물 收支 分析

降水量 (Precipitation)은 流出量 (Runoff)과 損失量의 合이라고 表示할 수 있다. 즉

$$P = R + (\text{Catchment Losses}) \\ = R + (ET_0 + DP + DSM + DGW) \dots\dots\dots(1)$$

P : 降水量 (Precipitation)

R : 流出量 (Runoff)

ET₀ : 蒸發散量 (Evapotranspiration)

DP : 地下滲透量 (Deep Percolation)

DSM : 土壤水分變化量 (Change of Soil Moisture)

DGW : 地下水貯溜量 (Change in Groundwater Storage)

式 (1)에서 本 研究의 對象地點이 Pulukan 水文地點에서와 같이 DP, DSM, DGW 등의 量이 時差를 두고 서서히 水文測定量에 包含되는 것이 확실한 콘크리트造 Weir Type 測水地點에서는 月間變化(增, 減)量의 代數和가 年間週期變動檢討¹²⁾ 時에 月間相殺돼 0 (零)에 近接함으로써 流出에 크게 作用하는 因子 ET₀ 하나로 생각하면

$$P = R + ET_0 \dots\dots\dots(2)$$

$$R = P - ET_0 \dots\dots\dots(3)$$

式 (2), (3)에서 ET₀는 어느 流域의 計器蒸發量 (ET) 氣象資料로서 理論的 蒸發散量을 計算할 수 있으며 一般的으로 Penman⁴⁾ 式 Hargreaves^{5, 13)} 이 널리 利用된다.

上記란 理論的 根據에 依하여 現地年流出資料와 年降雨量資料의 點畫圖에서 보여준 것 같이 流出誘發 因子로서 제일큰 降雨量과 年損失量의 함수로서 다음과 같은 線形直線方程式을 取할 수 있다.

$$y = ax + b \dots\dots\dots(4)$$

여기서 y : 年 流出量 (Annual Runoff), mm

a : 常數 (Constant)

x : 年降雨量 (Annual Precipitation), mm

b : 流域損失量 (Catchment Losses), mm

本 研究에서는 上述한 Water Balance Equation 과 式 (4)형식에 의한 年間 流出量을 求하고 이를 地表面流出量 (Surface Flow)과 基底流出量 (Baseflow)으로 分離¹¹⁾ 하여 月間 先行 降雨量의 영향으로 變化하는 基底流出量을 解析하고자 한다.

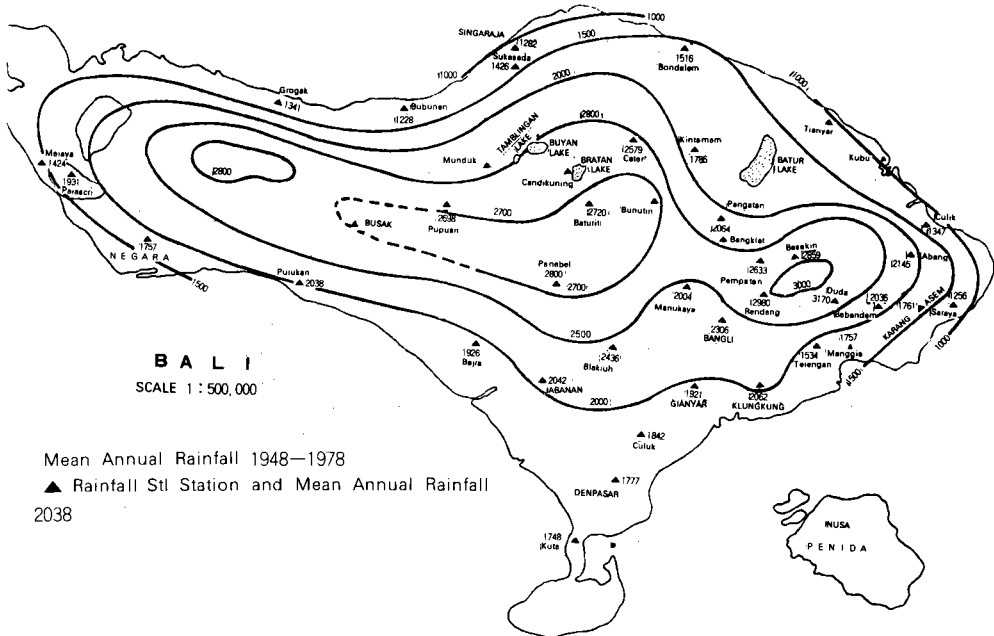


Fig. 1. Isohyet Map on Bali Island.

III. 資料 및 研究方法

1. 資料

Bali섬내의 162個 河川中에서 比較的 豊水流域 圈에 屬하는 Pulukan水系는 山間 河川流域으로서 傾斜가 15%程度이고, 土地利用面에서 보면 Coffee와 Coconut林이 40%, Shifting Cultivated Area가 30%, 高山林木 地帶가 20%이고 殘餘 5%程度가 草地로 利用되고 있다. Pulukan流域内에 利用可能한 水文資料는 Fig. 2에서와 같이 2個所의 降雨觀測所에서 觀測된 降雨量 記錄 38個年(1950~1987)間 資料와 1個所의 水位 觀測

所에서 觀測 및 測定된 水位記錄과 流量資料이다. 流況을 보면 本 研究에 쓰여진 資料 1974~1980까지의 記錄으로 考察하여 보면 雨期인 3月の 最大流量 4.1m³/sec이고 最少流量은 乾期인 8月에 0.6m³/sec으로 나타났다. 應用된 水位資料는 自記記錄 Chart에서 "Cut and Fill Method"에 依해 計算된 資料이다.

流域의 年平均降雨量 算定을 爲하여 長期 降雨 記錄으로 作成한 Fig. 1의 Isohyet Map on Bali Island를 使用하였다. 降雨量 形態를 본다면 Convective Type Rain이고 그 年降雨量의 크기는 海岸線 一帶는 1,000mm이고 Gunung Agung 山等에 山岳地域에서는 3,000mm이상된다.

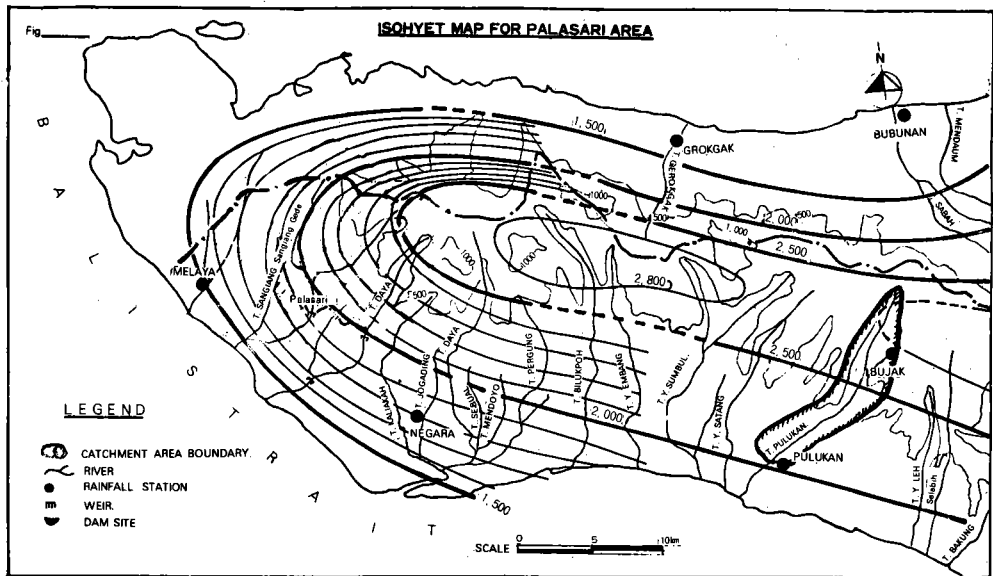


Fig. 2. Location of Pulukan River Basin.

Table-1. Climatological Data for Negara Station.

Item	Unit	Month												Mean
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Juj	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
Temperature	°C	28	28	28	27	27	26	25	26	27	28	28	28	27
Relative Humidity	%	81	80	82	81	82	81	81	77	79	78	77	79	80
Wind velocity	km/d	118	83	77	70	93	116	134	138	148	150	142	98	114
Sunshine Duration	%	41	47	49	65	61	56	64	68	63	66	61	51	58
Pan Evaporation	mm	5	6	5	5	5	5	5	5	6	6	6	5	5
Rainfall	mm	228	202	185	126	96	90	69	69	76	147	180	220	141

基底流出量推定을 위한 降雨 遲延反應模型 開發

流域損失量 및 蒸發散量 檢討에 利用한 資料는 Pulukan水文地點과 近接해 있는 Negara氣象觀測所 (EL 8.0m)에서 觀測된 5 個年 氣象觀測值 (1975~1980)을 利用하였으며 Table-1에 收錄한 것 같이 年平均 氣溫은 27°C이고 湿度 (Relative Humidity)는 80% 平均風速은 114km/day, 蒸發量은 5 mm/day이며 日照率은 58%이었다.

2. 研究方法

流域平均降雨量은 여러 方法이 있으나 Thiessen palygon과 Isohyetal Lines Method의 組合法을 應用하여 計算하였으며 그 一般式은 아래와 같으며 觀測所別 加重係數 (Weighting Factor or Multipliers) Table-2에 收錄하였다.

$$M_i = \frac{A_i \times R_i}{\sum A_i \times R_i} \dots\dots\dots (5)$$

Table-2. Thiessen Polygon Coefficient and Multipliers.

River Gauging Station	Rainfall Station	Thiessen Coefficient	Multipliers
7. Pulukan	Bujak	0.50	0.50
	Pulukan	0.50	0.44

Table-3. Areal Rainfall for Pulukan River Basin.

Year	CA = 52,6km ²												Total
	Jan	Fed	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
1973	246	255	116	315	187	165	72	12	367	461	384	206	2,786
1974	245	273	313	105	131	107	31	33	257	470	469	345	2,779
1975	340	183	403	318	153	0	63	55	293	325	448	270	2,851
1977	241	219	110	0	2	9	18	0	4	172	202	159	1,136
1978	377	233	354	341	323	446	210	114	151	239	258	424	3,470
1979	329	232	289	126	333	157	100	166	53	88	285	264	2,422
1980	303	100	185	339	153	0	0	0	26	92	312	430	1,940
Mean*	319	204	309	246	219	142	81	74	156	243	354	346	2,693

Note : Asterisk(*) indicate an average rainfall of five (5) years excluded 1973, 1977.

여기서,

M_i : 觀測所의 加重降雨量 (Rainfall Weighting for Station i)

A_i : i 觀測所가 支配하는 多角網內 面積 (Thiessen Polygon Area for Station i)

∑ A_i : 全體流域面積 (Total Catchment Area)

R_i : 等雨量圖로 부터 求한 i 觀測所가 支配하는 多角網內 年平均 降雨量 (Mean Annual Rainfall in Thiessen Polygon Area for Station i from Isohyet Map)

R_i : i 觀測所의 長期觀測值 年平均降雨量 (Long-Term Mean Annual Rainfall at Station i)

本 方法을 利用하여 計算한 pulukan 流域의 平年 降雨量은 2,693mm로 나타났고 Table-3에서 보는바와 같이 月別로 계산하였다.

流域平均降雨量 適用에서 큰 값을 擇하기爲하여 面積降雨量을 Table-4에서와 같이 比較한

Table-4. Comparison of Areal Rainfall and Point Rainfall.

Month	Point Rain at Pulukan	Unit : mm	
		Areal Rainfall	
		Thiessen + Isohyetal line	Arithmetic mean
Jan	243	319	314
Fed	233	204	292
Mar	207	309	278
Apr	154	246	199
May	129	219	153
Jun	90	142	97
Jul	88	81	77
Aug	74	74	61
Sep	97	156	75
Oct	44	243	175
Nov	238	354	271
Dec	258	346	318
Total	1855	2693	2310
Mean	159	224	193

바 地點降雨量이 Thiessen polygon과 Isohyetal Line 組合方法에 의한 값의 71%程度이고 算術平均 降雨量은 86%에 不過한 降雨量으로 나타났으며 流出模型檢定에서 說明한 바와같이 本 研究에서는 實測流況과 接近하는 Thiessen polygon과 Isohyetal Line 組合方法으로 계산한 값을 適用하였다.

基底流出 Model 誘導에 使用될 年流出高(Runoff Depth)는 다음 方程式을 使用하여 日別流量資料로 부터 換算하였으며 Table-5에서와 같이 19個 水文觀測 地點에서 相異 年度別로 適用할 수 있도록 Rating Equation을 유도하였고 Pulukan 水文地點에 관계식만을 收錄하였다.

$$RD = \frac{Q \times 86.4}{CA} \dots\dots\dots (6)$$

여기서,

RD : 流出高(Runoff Depth), mm

Table-5. Rating Equations for Pulukan River Gauging Station.

River/Station	CA, km ²	Equation	Range	Period
Pulukan/Pulukan	52.6	$Q_m = 10.0H^{5.2}$	$0.50 \leq H \leq 1.1$	1973~1977
		$Q = 8.96H^{5.94}$	$0.60 \leq H \leq 1.2$	1978
		$Q = 10.95H^{5.51}$	$0.60 \leq H \leq 1.0$	1979
		$Q = 11.0H^{6.097}$	$0.50 \leq H \leq 1.2$	1980

Table-6. Correlation between Pan-Evaporation and Evapotranspiration.

Month	Evaporation mm	Evapo-Tr-anspiration mm	$\frac{ET_0}{EVP}$ %
Jan	167	150	0.90
Feb	154	139	0.90
Mar	161	148	0.92
Apr	159	150	0.94
May	149	136	0.91
Jun	138	120	0.87
Jul	146	136	0.93
Aug	164	208	1.27
Sep	177	162	0.92
Oct	192	189	0.98
Nov	186	180	0.97
Dec	167	164	0.98
Total	1960	1882	
Average			0.96

Q : 流出量(Discharge), m³/sec

CA : 流域面積(Catchment Area for the Station), km²

Pulukan 流域에서의 蒸發散量은 Penman과 Soloman式에 의하여 計算하여 比較하고 Model開發에는 Penman의 값을 適用하였다. Pulukan 流域에서 年平均 蒸發散量과 Negara 觀測所 記錄蒸發量과의 相關性檢討를 Table-6에서와 같이 行하였다. 乾期인 8月の 1.27를 除外하고는 ET_0/EVP 의 比率이 90%이었다. 8月中에 1.27의 係數는 熱帶地方에서 있을 수 있는 낮은 相對湿度에서 基因된 것으로 풀이된다. 月間 ET_0/EVP 의 相關曲線은 Fig. 3과 Fig. 4에서 나타내었다. 그리고 penman과 Soloman method에 一般式은

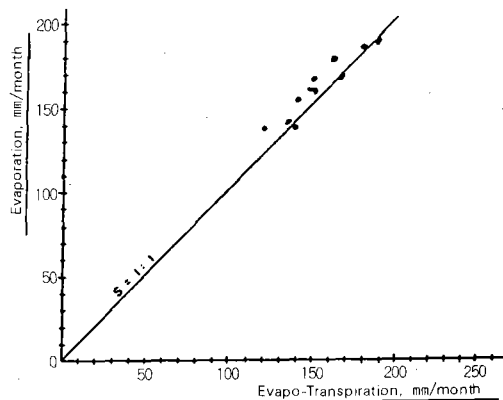


Fig. 3. Evaporation vs Evapotranspiration.

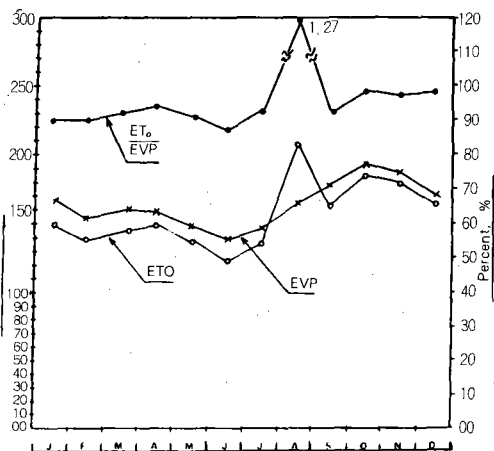


Fig. 4. Monthly Evaporation and Evapotranspiration (ET_0/EVP).

基底流出量推定을 위한 降雨 遲延反應模型 開發

다음과 같이 表示된다.

Penman 式 :

$$ET_o = C(W \cdot R_n + (1 - W) \cdot f(u) \cdot (e_a - e_a)) \dots (7)$$

여기서,

ET_o : 蒸發散量, (mm/day)

W : 氣溫과 關聯되는 加重係數 (Temperature-Related Weighting Factor)

R_n : 純輻射熱 (Net Radiation in Equivalent Evaporation), mm/day

f(u) : 風速函數 (Wind-Related Function)

(e_a - e_a) : 乾球와 濕球와의 蒸氣差 (Difference between the Saturation Vapour Pressure at Mean Air Temperature and the Mean Actual Vapour Pressure of the Air), mbar

C : 補正係數 (Adjustment Factor to Compensate for the Effect of Day and Night Weather Conditions)

Soloman은 年間降雨量과 計器蒸發量 資料로서 蒸發散量을 計算하는 方法을 式 (8)과 같이 추천하였다.

$$ET_o = RF \cdot (1 - e^{-ET/RF}) \dots (8)$$

여기서,

ET_o : 蒸發散量, mm/day

RF : 降雨量, mm

ET : 計器蒸發量, mm

IV. 結果 및 考察

1. 降雨量-流出量 模型誘導 (Rainfall - Runoff Relationships, ARO).

年間 可用水資源 利用計劃과 用水供給計劃 樹立에 必要한 流出量 算定은 計器觀測流域의 可用水 資料로서 模型開發을 하여 無計器觀測 流域에서 應用하는 것이 普編化되어 있다. 任意 流域에서 使用可能性 檢討와 先行降雨量에 依한 河川의 基底流出 分布 研究로서 얻은 結果를 比較하기 爲한 試圖로 ARO Model을 誘導하였고, 물取支理論을 導入한 ARO Model의 一般式은

$$ARF = ARO + (ET_o + DP + DSM + DGW),$$

$$ET_o = ARF \{ (1 - \exp(-ET/ARF)) \}$$
 이다

流域損失量內에서 比重이 제일 큰 ET_o와 流域

內에서 直接觀測이 어렵고 微少한 DP, DSM, DGW의 損失因子는 本研究의 對象地點인 pulukan 水文地點과 같이 Concrete造의 Weir型 곳에서는 流域損失量이 時差를 두고 水文測定量에 包含되어 나타나는 것이 확실하고 年間週期變動檢討¹²⁾ 에서는 月間增減變動量이 상쇄되어 0 (零)에 近접 함으로 Catchment losses = ET_o + DP + DSM + DGW와 같이 한개의 單位 因子로 假定하였고, Bali섬의 全體 流域에서 損失量은 Table- 7

Table-7. Calculation of Potential Rainfall Losses by River Basin.

Station	Catchment Area km ²	Rainfall	Runoff	Losses
Lalanglinggah	152	3459	2105	1354
Sorga	43	1781	606	1175
Denposar	25	2310	1118	1192
Sawan	83	2440	1012	1428
Leboksemawa	79	3369	2039	1330
Umadesa	87	3963	1822	1141
Pulukan	53	2662	1498	1164
Sidan	65	2919	1405	1514
Buangga	202	3095	1647	1448
Silakarang	108	2298	831	1467
Sibetan	8	3491	2291	1193
Tiyingtali	28	2003	778	1225
Cegeng	209	2655	1601	1054
Titab	55	2986	2038	948
Gitgit	10	3996	2600	1396
Bedahulu	57	2068	1231	837
Luwus	22	2065	647	1418
Jero Pengentuk	33	1455	687	768
Banjar	36	1855	315	1540
Mean		2677	1383	1242

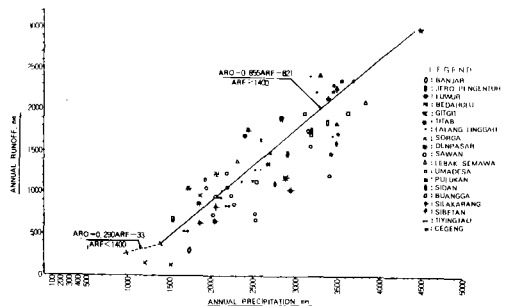


Fig. 5. Rainfall-Runoff Relationships in Bali Island.

에서 보여준 것과 같이 平均流域損失量은 1,242 mm이고 年間流出量은 1,383mm로서 流域平均年降雨量 2,677mm에 對하여 52%의 流出率을 나타냈다. Fig. 5와 같이 各年度別로 降雨 및 流出高값을 正規方眼紙에 點畫(Plotting)하여 그 資料가 分布되는 傾斜 및 分布 性向에 따라 年間流出量 값이 平均的으로 包括될 수 있는 $y = Ax + B$ 의 線形方程式 降雨量이 1,400mm以上 일때와 1,400mm未滿일때 使用할 수 있는 方程式(9)와 (10)을 誘導하였다.

$$ARO = 0.855ARF - 821, \quad ARF \geq 1,400\text{mm} \dots (9)$$

$$ARO = 0.290ARF - 33, \quad ARF < 1,400\text{mm} \dots (10)$$

여기서,

ARO : 年間流出量, mm

ARF : 年間降雨量, mm

Table-8. Correlation between Observed and Calculated Runoff by ARO on Bali at Pulukan Station.

Year	Rainfall(p)	Runoff		Correlated ratio ARO OBS
		Observed OBS	Calculated by ARO*	
1974	2779	1360	1555	1.14
1975	2851	1919	1616	0.84
1978	3470	1522	2145	1.40
1979	2422	1798	1249	0.69
1980	1940	899	838	0.93
Mean	2693	1500	1481	0.99

Note ; Rainfall-Runoff Relationships, ARO
 $ARO = 0.855ARF - 821, \quad ARF \geq 1400$
 $ARO = 0.290ARF - 33, \quad ARF < 1400$

RAINFAU-RUNOT RELATIONSHIP, ARO 로 Bali全體의 年平均 流出量과 Pulukan流域에서 實測流出量과를 Table-8에서와 같이 比較해 본 결과 5個年 觀測值流出量 1,500mm와 ARO Model로 推定한 값인 1,481mm로서 兩者가 99%로 近接함을 보여 주고 있다.

2. 降雨遲延反應模型開發(Development of Rainfall-Delayed Response Model, RDR for Pulukan River Basin)

Pulukan流域內에서 降雨遲延反應模型의 最適合 模型係數 決定을 爲한 Simulation엔 Table-9에 水文觀測值 및 計算資料 5個年 (1974~1980)值를 利用하여 Fig. 6에서와 같이 그 樣狀을 圖示하고 年間流出量(ARO)을 地表面 流出(Surface Runoff, ASRO)과 地下滲透等에 의해서 常時河川流出로 나타나는 基底流出量(Baseflow, ABF)으로 分離하였다.

計算한 ASRO와 ABF의 函數를 RDR Model에 入力하여 各月の 降雨遲延反應係數의 計算은 Casio PB-700, FA-11 Computer System에 의해서 演算處理 하였다.

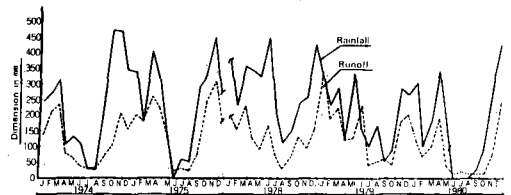


Fig. 6. Observed Records of Rainfall and Runoff in Pulukan River Basin.

Table-9. Observed Rainfall and Runoff at Pulukan River Gauging Station.

Year	Item	CA = 52.6 km ²												Total
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
1974	Rainfall	245	273	313	105	131	107	31	33	257	470	469	345	2,779
	Runoff	137	212	234	79	66	39	31	26	69	102	207	158	1,360
1975	Rainfall	340	183	403	318	153	0	63	55	293	325	448	270	2,851
	Runoff	203	183	260	227	138	25	31	26	79	244	320	183	1,919
1978	Rainfall	377	233	354	341	323	446	210	114	151	239	258	424	3,470
	Runoff	199	156	229	128	(92)	168	71	31	69	132	94	153	1,522
1979	Rainfall	329	232	289	126	333	157	100	166	53	88	285	264	2,422
	Runoff	336	189	224	123	127	231	41	51	59	41	177	199	1,798
1980	Rainfall	303	100	185	339	153	0	0	0	26	92	312	430	1,940
	Runoff	122	68	97	187	37	14	20	14	14	14	73	239	899
Mean	Rainfall	319	204	309	246	219	142	81	74	156	243	354	348	2,693
	Runoff	199	162	209	149	92	95	39	30	58	107	174	186	1,500

가. 地表面流出分離 (Surface Runoff, ASRO)

年間地表面 流出量 分離는 ARO Model에 依해서 年流出高를 計算하고 이에 對하여 年間 基底流出量을 除한 量을 當年の 直接流出量으로 定하고 當月の 直接流出分布는 Calendar month내에서 遲滯는 無視하였고 當年度 月別降雨量 分布와 같다고 假定하였다.

나. 基底流出分離 (Baseflow, ABF)

任意月에 基底流出量은 當月の 降雨量이 地下 浸透 또는 貯溜遲滯 現象으로 Recharge되는 量과 數個月前의 降雨量이 위와 同一한 現象으로 Recharge된 量이 合해져서 任意時期에 常時基底流出量으로 나타나는 것으로 그 變化의 感應도가 直接流出量보다 時差를 두고 나타나게 된다. Pulukan 水文地點에서는 Table-3의 5個年の 觀測 資料를 利用하였고 每年度의 Baseflow는 乾期인 5月~9月中에 平均河川流量을 基準하여

Table-10. Calculation of Baseflow at Pulukan Station.

Year	Period	Average Baseflow mm	Percentage of Baseflow to Total Annual Runoff %
1974	May-Sep	46.2	41.0
1975	May-Sep	59.8	37.0
1978	May-Sep	86.2	67.9
1979	May-Sep	85.0	56.7
1980	May-Sep	19.8	26.0
Mean		59.4	47.5 (= 48)

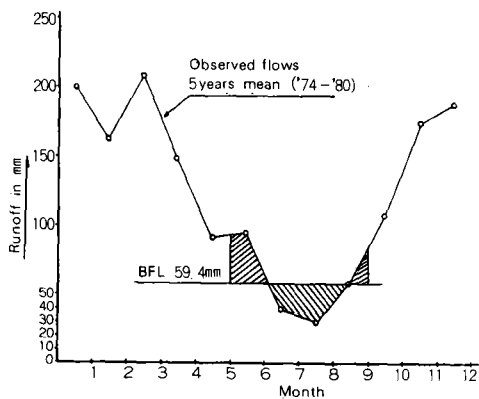


Fig.7. Separation of Baseflow at Pulukan Station.

計算 하였으며 Pulukan流域과 같이 流量觀測資料가 짧은 地域에서 過去 降雨記錄에 依한 長期 流出量 推定을 爲해서는 流域의 適正 Model 誘導가 必要함으로 5個年 資料로서 平均基底流出量을 計算하였다.

Table-10에서와 같이 年間流出量 ARO에 對하여 ABF Ratio는 48%이고 流出深으로 換算하면 59.4mm가 되며 이 값을 RDR Model 誘導에 適用하고 5個年 平均基底流出深圖를 Fig. 7과 같이 圖示하였다.

다. 降雨遲延 反應 模型 (Rainfall-Delayed Response Model, RDRM)

RDR Model의 基本理論인 물收支方程式을 年間 流出量(Qn)으로 바꾸면

$$Q_n = ASRO + ABF \dots\dots\dots (11)$$

$$ASRO = (P) - (ET_o + DP + DSM + DGW) \dots\dots (12)$$

위의 式(11)과 (12)의 地表面流出과 基底流出量을 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$ASRO = 0.52 ARO \dots\dots\dots (13)$$

$$ABF = 0.48 ARO \dots\dots\dots (14)$$

$$P_{(n)} = R_{(n)} / ARF \dots\dots\dots (15)$$

$$SRO_{(n)} = P_{(n)} \cdot ASRO \dots\dots\dots (16)$$

$$P_{(n)} = C \cdot P_{(n)} + C_{n-1} \cdot P_{(n-1)} + C_{n-2} \cdot P_{(n-2)} + C_{n-3} \cdot P_{(n-3)} \dots\dots\dots (17)$$

式이 成立이 된다 따라서

$$BF_{(n)} = P_{1(n)} \cdot ABF \dots\dots\dots (18)$$

$$Q_{(n)} = SRO_{(n)} + BF_{(n)} \dots\dots\dots (19)$$

가 된다.

여기서,

ARF : 年間降雨量 (Annual Rainfall)

ARO : 年間流出量 (Annual Runoff)

ASRO : 年間地表面流出量 (Annual Surface Runoff)

ABF : 年間基底流出量 (Annual Baseflow)

R_(n) : n月の 降雨量 (Rainfall in Month (n))

P_(n) : n月の 降雨量分布率 R_(n) (Expressed as a Proportion of ARF)

SRO_(n) : n月の 地表面流出量 (Surface Runoff in Month (n))

P_{1(n)} : 年間基底流量에 對한 n월에 發生한 基底流出量의 比率 (Proportion of ABF)

Occuring in Month(n))

$BF_{(m)}$: n月的 基底流出量 (Baseflow in Month (n))

$Q_{(m)}$: n월에 總流出量 (Total Runoff in Month(n))

式(17)을 應用하여 Pulukan流域에서의 流出量은 몇個月前 降雨로 부터 影響이 되고 있는지의 檢討를 하였다. 任意 時點에서 1個月, 2個月, 3個月 및 4個月前에 月降雨量을 RDR Model 에 入力시키고 C_1, C_2, \dots, C_{n-3} 의 函數算出은 Casio-PB-700 Computer System으로 電算處理 하였으며,

Table-11에서 보는 바와 같이 代表的으로 1975年度の 電算結果를 各 Parameter別로 収録 하였다.

라. 結果 및 考察

1) 考察

Table-11에서와 같이 代表年度인 1975年度の 觀測된 年間流出量을 100%로 하고 月別流出 分布率의 合을 Computer 試算에 의한 값과 比較했을 때 實測한 年間流出量에 接近도가 最高 3.4%가 많았으며, 最低 1.0%以下로 적지않음이 判定되었다. 따라서 試算한 Model係數는 Rainfall-Delayed Response Model의 一般式인 (17)에 代入 하여 整理하면,

$BF_{(m)}$ 또는 RDR Model은 즉
 $RDR Model = C \cdot P_{(m)} + C_1 \cdot P_{(n-1)} + C_2 \cdot P_{(n-2)} + C_3 \cdot P_{(n-3)} + C_4 \cdot P_{(n-4)}$, $Rc = 1.00$
 $RN. A = 0.40P_{(m)} + 0.50P_{(n-1)} + 0.10P_{(n-2)}$, $Rc. a = 1.013$
 $RN. B = 0.30P_{(m)} + 0.60P_{(n-1)} + 0.10P_{(n-2)}$,

$Rc. b = 1.016$
 $RN. C = 0.45P_{(m)} + 0.50P_{(n-1)} + 0.03P_{(n-2)} + 0.02P_{(n-3)}$, $Rc. c = 1.012$
 $RN. D = 0.40P_{(m)} + 0.50P_{(n-1)} + 0.06P_{(n-2)} + 0.04P_{(n-3)}$, $Rc. d = 1.015$
 $RN. E = 0.40P_{(m)} + 0.45P_{(n-1)} + 0.10P_{(n-1)} + 0.05P_{(n-3)}$, $Rc. e = 1.056$
 $RN. F = 0.17P_{(m)} + 0.40P_{(n-1)} + 0.23P_{(n-2)} + 0.12P_{(n-3)} + 0.08P_{(n-4)}$, $Rc. f = 1.034$
 $RN. G = 0.25P_{(m)} + 0.40P_{(n-1)} + 0.20P_{(n-2)} + 0.10P_{(n-3)} + 0.05P_{(n-4)}$, $Rc. g = 1.027$
 $RN. H = 0.20P_{(m)} + 0.40P_{(n-1)} + 0.20P_{(n-2)} + 0.10P_{(n-3)} + 0.10P_{(n-4)}$, $Rc. h = 0.990$

여기서 Rc : 各月の 流出分布率의 年間總和이다.

分析結果를 볼때 Pulukan流域에서 前月降雨에 影響은 觀測值와 推定한 年流出量 差를 比較한 8個의 Model Test 結果表 Table-11에서 보는 바와 같이 誤差의 範位가 +3.4%와 -1.0%로 나타났다. 그러므로 水資源利用面에서 觀察할 때 水文設計는 가장 不利한 河川의 流況 條件을 滿足하는 計劃이어야 하므로 年間全體 流出量도 重要하지만 特히 乾期와 雨期로 區分되는 熱帶地方에서는 乾期中에 7月~8월에 Baseflow 量의 比重이 크므로 上述한 8個의 Running Model 中에서 RN.C는 Rc.c=1.012이고, 年間流量으로 볼때는 觀測值보다는 1.2%가 큰것으로 나타났으나 이는 水文學的 判定으로 볼때 그리 重要하지 않은 雨期間에 높은 流出을 보인것이므로 別問題가 없을 것으로 判斷되며 7月과 8月中에 定量的인 接近도가 높아 Pulukan流域에서의 最適合 RDR 模型은 RN.C Model로 判定되며 方程式으로 表示하면 다음과 같다.

Table-11. Summary of Simulation in Different Parameters.

YEAR : 1975 Unit :

Run No.	Parameter					Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
	P_n	P_{n-1}	P_{n-2}	P_{n-3}	P_{n-4}													
	Observed					0.106	0.095	0.135	0.118	0.072	0.013	0.016	0.014	0.041	0.127	0.166	0.095	1.000
A	0.40	0.50	0.10	-	-	0.126	0.097	0.100	0.121	0.091	0.038	0.014	0.018	0.052	0.099	0.130	0.127	1.013
B	0.30	0.60	0.10	-	-	0.127	0.103	0.092	0.124	0.097	0.043	0.012	0.018	0.044	0.097	0.125	0.134	1.016
C	0.45	0.50	0.03	0.02	-	0.124	0.095	0.101	0.125	0.085	0.033	0.013	0.020	0.056	0.103	0.131	0.126	1.012
D	0.40	0.50	0.06	0.04	-	0.126	0.099	0.100	0.123	0.088	0.039	0.016	0.020	0.052	0.099	0.126	0.127	1.015
E	0.40	0.45	0.10	0.05	-	0.128	0.100	0.103	0.120	0.089	0.042	0.019	0.020	0.051	0.094	0.125	0.125	1.016
F	0.17	0.40	0.23	0.12	0.08	0.136	0.120	0.105	0.114	0.103	0.069	0.040	0.027	0.034	0.067	0.100	0.119	1.034
G	0.25	0.40	0.20	0.10	0.05	0.134	0.113	0.105	0.115	0.098	0.061	0.034	0.024	0.040	0.075	0.108	0.120	1.027
H	0.20	0.40	0.20	0.10	0.10	0.133	0.119	0.106	0.115	0.102	0.064	0.040	0.029	0.038	0.070	0.101	0.116	0.990

基底流出量推定을 위한 降雨 遲延反應模型 開發

$$P_{1(m)} = 0.45P_{(m)} + 0.50P_{(m-1)} + 0.03P_{(m-2)} + 0.02P_{(m-3)} \dots\dots\dots(20)$$

여기서 Pulukan流域에서는 “RDR Model C”가 설명하듯이

- ① 任意月の 降雨量은 當該月の 基底流出量の 45%,
- ② 1個月前の 降雨量은 基底流出量の 50%
- ③ 2個月前の 降雨量은 基底流出量の 3%

Table-12. Comparison between Monthly Runoff Coefficients of Observed and Estimated by Model C.
 Model C : $0.45P_n + 0.50P_{n-1} + 0.03P_{n-2} + 0.02P_{n-3}$ Unit : %

Year	Item	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual discrepancies	
														Coefficients	Flows, mm
1974	Observed	0.100	0.156	0.172	0.058	0.049	0.028	0.023	0.019	0.050	0.075	0.152	0.116	1.00	1360
	Estimated	0.084	0.093	0.103	0.078	0.028	0.045	0.027	0.014	0.052	0.131	0.165	0.147	0.967	1339
1975	Observed	0.106	0.095	0.135	0.118	0.072	0.013	0.016	0.014	0.041	0.127	0.166	0.095	1.00	1919
	Estimated	0.124	0.095	0.101	0.125	0.085	0.033	0.013	0.020	0.056	0.103	0.131	0.126	1.012	1926
1978	Observed	0.131	0.102	0.150	0.084	0.060	0.110	0.047	0.020	0.045	0.087	0.062	0.100	1.00	1522
	Estimated	0.123	0.092	0.084	0.099	0.094	0.108	0.096	0.050	0.039	0.054	0.070	0.095	1.004	1523
1979	Observed	0.186	0.105	0.124	0.068	0.047	0.128	0.022	0.028	0.032	0.022	0.098	0.110	1.00	1798
	Estimated	0.125	0.117	0.107	0.089	0.093	0.102	0.058	0.010	0.046	0.031	0.073	0.109	0.965	1768
1980	Observed	0.135	0.075	0.107	0.208	0.041	0.015	0.022	0.015	0.015	0.015	0.081	0.265	1.00	899
	Estimated	0.130	0.106	0.076	0.132	0.128	0.047	0.006	0.002	0.006	0.028	0.097	0.184	0.942	874
Mean	Observed	0.132	0.108	0.139	0.099	0.061	0.063	0.026	0.020	0.038	0.071	0.116	0.124	1.00	1500
	Estimated	0.122	0.100	0.097	0.103	0.087	0.069	0.044	0.031	0.042	0.071	0.107	0.127	1.00	1498

Table-13. Example of Runoff Calculation for 1980 Year.

Annual rainfall (ARF) = 1,940 Surface runoff (ASRO) = 467
 Annual runoff (ARO) = 899 Baseflow (ABF) = 432

Month	Rainfall (ARF) (mm)	P(n)	Surface runoff (ASRO) (mm)	$0.45P_{(n)}$	$0.50P_{(n-1)}$	$0.03P_{(n-2)}$	$0.02P_{(n-3)}$	$0.0P_{(n-4)}$	$P_{1(n)}$	Base-flow (ABF) (mm)	Total runoff (mm)	Runoff coefficient
1979Oct	88	0.036										
Nov	285	0.117										
Dec	264	0.109										
1980Jan	303	0.156	72.9	0.070	0.055	0.004	0.001		0.130	56.2	129.1	0.42
Feb	100	0.051	23.8	0.023	0.078	0.003	0.002		0.106	45.8	69.6	0.69
Mar	185	0.095	44.4	0.043	0.026	0.005	0.002		0.076	32.8	77.2	0.41
Apr	339	0.175	81.7	0.079	0.048	0.002	0.003		0.132	57.0	138.7	0.40
May	153	0.079	36.9	0.036	0.088	0.003	0.001		0.128	55.3	92.2	0.60
Jun	0	0	0	0.000	0.040	0.005	0.002		0.047	20.3	20.3	
Jul	0	0	0	0.000	0.000	0.002	0.004		0.006	2.6	2.6	
Aug	0	0	0	0.000	0.000	0.000	0.002		0.002	0.9	0.9	
Sep	26	0.014	6.5	0.006	0.000	0.000	0.000		0.006	2.6	9.1	0.35
Oct	92	0.047	21.9	0.021	0.007	0.000	0.000		0.028	12.1	34.0	0.36
Nov	312	0.161	75.2	0.073	0.024	0.000	0.000		0.097	41.9	117.1	0.37
Dec	430	0.222	103.7	0.100	0.081	0.002	0.001		0.184	79.5	183.2	0.42
Annual	1940	1.000	467.0						0.942	407.0	874.0	0.45

Baseflow : 5.8% carried over to following year ; Total flow $100 - \frac{(874.0)}{(899.0)} \times 100 = 2.8\%$ carried over to following year

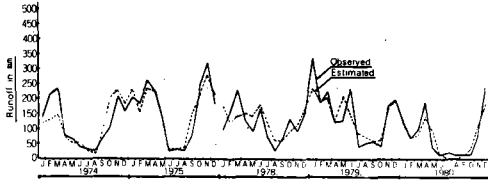


Fig. 8. Comparisons between Observed and Estimated Flows at Pulukan Station.

④ 3個月前的 降雨量은 基底流出量의 2%의 比率로서 基底流出量 發生에 影響을 주고 있음을 알 수 있다.

2) 結果值 比較

RDR Model C의 檢定 및 適合性 判定을 爲하여 Pulukan 流域 平均 降雨量 5個年資料(1974~1980年, Table-3)를 $ASRO=0.52 \cdot ARO$, $ABF=0.48 \cdot ARO$ 에 代入 分離하고 RDR Model C에 入力시켜 各年度의 月基底 流出係數와 年總 流出量(地表直接流出量+基底流出量)을 Table-12에서와 같이 比較 取錄하였다. 結果值를 年度別로 比較하여보면 推定한 流出量이 1974年度에는 -3.3% 적게 나타났고, 1975年度에는 +1.2% 크게, 1978年度에는 +0.4%, 1979年度에는 -3.5%, 1980年度에는 $\pm 0\%$ 로 나타났다. 또한 各年度의 月別 流出量 比較를 Fig. 8에 圖示하였다.

3 RDR Model의 實行列

RDR Model의 實用化를 위한 例를 1980年度와 같이 連續 3個月間(6月, 7月, 8月) 無降雨月이 있는 해를 標本으로 擇하여 Table-13과 같이 計算하였다. 그 結果를 考察하여 볼때 無降雨月이었지만 6月에는 20.3mm, 7月에는 2.6mm, 8月에는 0.9mm의 流出이 發生한 것으로 보아 數個月前 先行降雨의 遲延反應 影響으로 流出이 나타남을 알 수 있다. 또한 年間 可能 總流出量의 2.8%는 次期年度로 移越되고 年間基底流量의 5.8%가 다음 年度로 移越되어 RDR Model의 基本理論인 降雨遲延反應이 發生함이 立證되었다.

VI. 結 論

물 資源 保全을 爲한 各種 Dam 計劃, 水文學의 基本計劃을 樹立함에 있어 河川의 基底流出의 適正量을 判定하는 것은 무엇보다도 重要한 事項이라 하겠다. 本 研究에서는 Bali 섬의 Pulukan 水系

를 中心으로 任意地點에서 月間 또는 年間水資源 可用性 判定에 適用할 수 있는 模型을 開發하기 爲하여, 等雨量線圖法 및 多角網法과의 組合方法으로 面積雨量을 求하고, 10年以上 觀測記錄을 가지고 있는 42個地點의 降雨量을 利用하여 流出高를 계산하고 氣象觀測資料로 부터 流域蒸發散量을 推定하여 降雨-流出量 模型을 誘導하였으며, 이어서 降雨遲延反應模型 RDR Model을 誘導하였다.

그 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 河川에서의 물收支는 降雨量과 流域損失(蒸發散量+地下水貯留量+土壤水分移動變化)을 單純化하고 年降雨量 對 年流出量 方程式 $ARO_1=0.855ARF-821$, $ARF \geq 1,400mm$ $ARO_2=0.290ARF-33$, $ARF < 1,400mm$ 를 誘導하고 ASRO, ABF 分離作業에 應用하였다.

2. 降雨遲延反應模型(Rainfall-Delayed Response Model) Test에서 流域平均降雨量은 多角網圖와 等雨線圖法의 組合方法(Thiessen & Isohyetal Lines' Combination Method)에 의한 값이 가장 適正한 것으로 나타났다.

3. 降雨遲延反應 模型에 있어서 Pulukan 流域에서 量的 有意水準이나 水文反應의 物理的 意味로 볼때 試案模型C가 가장 適正한 것으로 나타났다.

$$\text{즉 } P_{1,(n)} = 0.45P_{(n)} + 0.50P_{(n-1)} + 0.03P_{(n-2)} + 0.02P_{(n-3)} \text{ 이다.}$$

4. Pulukan地點의 5個年 觀測流量資料에서 推出 分離한 平均 基底流出深은 59.4mm이고, 年流出量에 對해서는 48%인 것으로 RDR Model의 檢定에서 確認되었다.
5. RDR Model Test에서 實測值와 推定 流出量과의 定量的 差異는 接近도가 +3.4%와 -1.0%의 差로 近接近이 考察되었다.
6. 連續 3個月 無降雨時에도 降雨遲延反應影響에 의하여 年間再現 可能流出量의 2.8%가 翼年으로 移越되고 年間基底流出量의 5.8% (참조 Table-13)가 다음年度로 移越되었음이 Model Test에서 究明되었다.

參 考 文 獻

1. Bali Irrigation Sector Project, Hydrologic Study for Subak System Detail Design, by ELC-ADC Consulting Engineers, Bali DGWRD, Indonesia, 1983.
2. Bali Irrigation Project, Part 1, Service Appendix B. Hydrometeorology, DGWRD Bali, Indonesia, by ELC-ADC Consulting Engineers, 1980.
3. Bali Irrigation Project Feasibility Study, Part 2, Palasari Storage Dam, Vol 3, DGWRD, Bali, Indonesia. By ELC-ADC Consulting Engineers, 1981.
4. Crop Water Requirements, FAO, Irrigation and Drainage Paper No.24. Food and Agriculture Organization of the United Nation, Rome, 1977.
5. Hargreaves, G. H., Estimation of Potential and Crop Evapotranspiration. Trans. of the ASAE, : 701-704, 1974.
6. Kim, Tai Cheol, Regionalised Regression Model for Monthly Streamflow in Korea Watersheds, 1983.
7. Mock, F. J., Land Capability Appraisal Indonesia. Water Availability Appraisal-Report Prepared for the Land Capability Appraisal Project, Water Resources Consultant, FAO of UN, Bogor, Indonesia, Feb. 1973.
8. Rain Observation of Indonesia, Meteorological and Geophysical Services Department of Air-Communication, Jakarta. Vol. 72-Vol.89.
9. Publikasi Sub-direktorat Hidrologi-Data Aliran Sungai-Sungai di Indonesia (Hydrological Publication for Flow Data on Rivers in Indonesia, DPMA, Bandung, 1968-1932, 1950-1980.
10. Choi, Ye Hwan, Studies on the Characteristics of the Precipitation Runoff for Small Watershed-In Korea and the Netherlands, 1982.
11. Technical Feasibility and Basic Design, Palasari Dam, Bali, Indonesia, DWGRD, Government of Indonesia, 1978.
12. 朴成守外 5人 共著, 應用水文學, 鄉文社, 227-239, 1984.
13. 嚴泰營, 洪鍾震, Hargreaves 式에 依한 必要水量 算定에 關한 小考, 農工學會誌, 1975.