

댐저수지군의 최적연계운영을 고려한 유출예측시스템모형 구축을 위한 기초적 연구

A Basic Study on the Flood-Flow Forecasting System Model with Integrated Optimal Operation of Multipurpose Dams

안 승 섭*
Ahn, Seung Seop

Summary

A flood-flow forecasting system model of river basins has been developed in this study. The system model consists of the data management system(the observation and telemetering system, the rainfall forecasting and data-bank system), the flood runoff simulation system, the reservoir operation simulation system, the flood forecasting simulation system, the flood warning system and the user's menu system. The Multivariate Rainfall Forecasting model, Meteorological factor regression model and Zone expected rainfall model for rainfall forecasting and the Streamflow synthesis and reservoir regulation(SSARR) model for flood runoff simulation have been adopted for the development of a new system model for flood-flow forecasting. These models are calibrated to determine the optimal parameters on the basis of observed rainfall,7 streamflow and other hydrological data during the past flood periods.

I. 서 론

홍수시 하천유역의 유출예측 시스템은 강우로 인하여 발생하는 홍수의 규모와 홍수의 침투발생시간을 가능한 한 정확하고 신속하게 예측하여 댐저수지의 수문조작에 의한 홍수조절을 가능하게 함은 물론 댐저수지 하류유역의 지역주민에게 사전에 홍수에 대한 예보(예상되는 수위와 시간의 예측)를 실시함으로써

홍수로부터의 인적·재산적 피해를 최소화할 수 있도록 구축되어야 한다.

하천유역의 유출예측은 유역내에 건설되어 운영되고 있는 다목적 댐저수지를 시뮬레이션 모형이나 최적화모형을 이용하여 연계운영하므로써, 저수지의 안전은 물론 댐저수지 하류하도의 홍수위를 가능한 한 낮게 유지하도록 홍수관리 시스템을 구축하는 것이 일반적이다. 홍수시 댐저수지군의 연계운영을 고

* 경북산업대학교 공과대학

키워드 : 최적연계운영, 유출예측시스템모형

려한 유출예측의 국외의 연구사례는 May (1985), Adams(1986), Unver(1987), David (1987), Ginn(1989) 등에 의하여 연구된 바 있고, 국내에서는 이(1992)에 의한 종합물관리 방안과 안 등(1992, 1993, 1994)에 의한 홍수시 유출예측 방법 및 박 등(1994, 1995)에 의한 영산강 홍수예보모형 연구가 진행된 바 있다.

그러나, 기존의 홍수시 하천유역의 유출예측 시스템에 대한 연구결과는 대부분 예측시스템의 시간단위와 댐연계운영에 대한 고려가 극히 제한적으로 연구되고 있을 뿐만 아니라 실시간 운영에 대한 연구도 극히 부진한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 다목적 댐저수지군의 연계운영을 고려한 홍수유출예측 시스템 모형의 구축을 위한 기초적 연구를 위하여 모형의 구축, 관측 및 예측호우에 대한 시스템 수립 및 홍수유출 시뮬레이션 모형 매개변수의 추정 등을 실시하였다.

II. 홍수시 유출예측 시스템모형의 기본이론

1. 홍수시 유출예측 시스템의 구성

본 연구에서는 홍수시 댐저수지군의 연계운영을 고려한 하천유역의 유출예측을 위한 시스템을 구축하기 위하여 fig. 1과 같이 6개의 하부시스템으로 구성하였다. 또한 모형의 구축을 위한 세부적인 방법으로서는 홍수유출 시뮬레이션의 기본모형을 SSARR모형으로 하고 저수지 운영관리자가 실제호우사상과 예상 호우사상을 이용하여 홍수유출예측을 수행할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

먼저, 기존에 발생한 호우사상을 대상으로 홍수시 댐저수지 연계운영을 고려한 유출예측을 실시하는 경우에는 유역내에 설치된 T/M 강우예측소에서 관측된 시간별 강우량 자료를 유출예측 시스템에 입력시키면 유역 및 하도 유출 모형의 매개변수와 댐의 저수지특성을 이용하여 댐저수지별 운영방식을 결정하고, 이 결과로부터 유역내의 종합적인 홍수유출 시뮬레이션을 실시토록 구성하였다.

다음으로, 예측강우자료를 이용하여 유출예

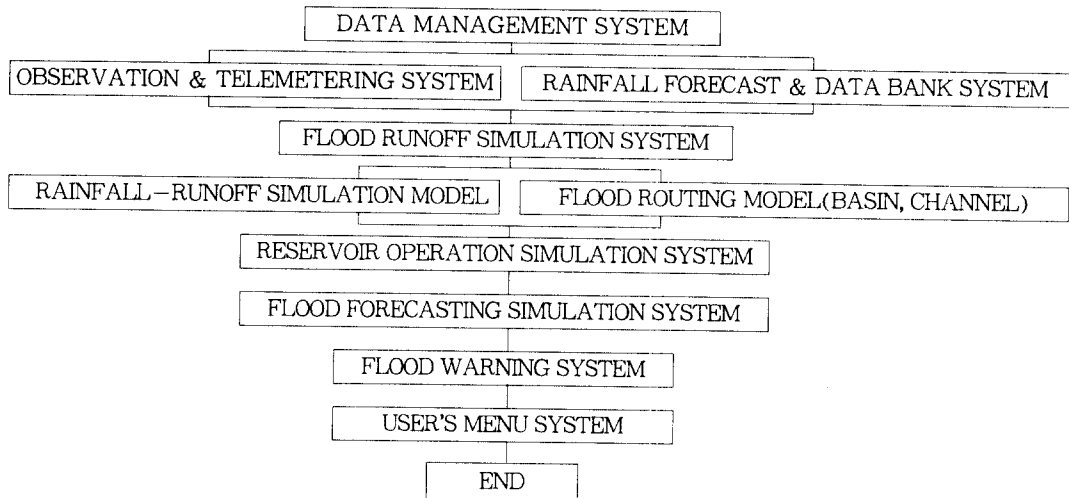


Fig. 1. Structure of Flood-Flow Forecasting System Model with Integrated Optimal Operation of Multipurpose Dams

측을 실시하는 경우는 강우예측을 기상인자회귀모형(Meteorological Factor Regression Model:MR Model)과 다변량모형(Multivariate Rainfall Forecasting Model : MF Model) 및 지역별 예상강우모형(Zone Expected Rainfall Model : ZE Model)을 이용하는 경우로 나누어서 예측을 실시하여 홍수유출예측 시스템에 입력시키면, 추정된 모형의 매개변수와 댐저수지 상태를 이용하여 댐수지별 운영방식을 결정한 후 소유역별 유출해석을 실시하여 유역의 홍수유출 시뮬레이션을 실시하고 본류 주요 지점별 홍수량을 검토하여 홍수예경보를 수행토록 구성하였다.

2. 강우예측시스템 모형

본 연구에서는 호우의 예측을 위한 모형으로서 기상인자회귀모형, 다변량모형 및 지역별 예상강우모형을 중심으로 분석하였다.

가. 기상인자회귀모형(MR Model)

MR모형은 일반적으로 중앙기상청 산하 각 기 상태에서 예보된 기상특성인자가 정확하다는 가정하에 강우량에 영향을 준다고 판단되는 기상변수들을 선정하여 강우량을 기상인자의 함수로 정의한 강우예측방법으로서, 기상특성인자 $Z_j(j=1, 2, \dots, K)$ 를 독립변수로, 강우량 Y 를 종속변수로 하는 다중선형 회귀방정식(Multiple Linear Regression Equation)으로 다음과 같이 표현된다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2 + \beta_3 Z_3 + \dots + \beta_k Z_k + e \quad (1)$$

여기서, e 는 종속변수 Y 를 추정하는데 발생하는 오차 항이며, β_0 는 상수이고 $\beta_j(j=1, 2, \dots, k)$ 는 변수 Z_j 의 계수이다.

나. 다변량모형(MF Model)

MF모형에 의한 강우예측은 강우사상에 대하여 신속하면서도 정확한 실시간 제어계의 실행에 목적을 두고 있으며, 실시간제어를 할 때 자료에 대한 불확정성을 감소시키기 위해서 호우

에 대한 매개변수의 추정이 선행되어야 한다. 다변량모형에 의한 강우예측 매개변수는 공분산, 강우진행속도와 방향, 환상 spectrum 및 유역의 대표강우분포양상 등이 있으며, 각 시간단계에서 관측소별로 측정된 강우강도는 전체 강우관측망을 형성함으로써 N지점에서 타지점으로 점차 강우예측이 가능해진다. 이들 지점들에 대한 강우예측식은 다음 식(2)와 같다.

$$z(t) = q(t) - m(t) = r(t) + v(t) \quad \dots\dots(2)$$

여기서, $q(t)$ 는 관측강우량의 $N \times 1$ 벡터, $m(t)$ 는 평균치의 $N \times 1$ 벡터, $r(t)$ 는 진잔차의 $N \times 1$ 벡터, $v(t)$ 는 측정오차의 $N \times 1$ 벡터이며, $z(t)$ 는 측정오차의 $N \times 1$ 벡터이다.

그리고, 임의의 시간 $t + \tau$ 에서의 예측강우량은 t 시간에서 예측한 $t + \tau$ 시간의 평균치벡터와 $t + \tau$ 시간 예측된 강우량의 잔차벡터의 합으로 표시되며 다음 식(3)과 같다.

$$i(t + \tau | t) = m(t + \tau) + r(t + \tau | t) \quad \dots\dots(3)$$

다. 지역별 예상강우모형(ZE Model)

ZE모형은 정량적인 강우예측 기법으로서 현재 중앙기상청에서 각 지역별 강우예측에 사용하고 있는 기법이다. 그러나 일반적으로 예측기법의 정확도를 높이기 위하여 대상유역내의 수문관측소에서 기왕에 관측된 강우량을 이용하여 집락분석(Clust analysis)을 실시하므로, 본 연구에서는 이 분석 결과를 이용하여 각 권역별 강우예측을 실시하였다.

집락분석은 임의의 모집단내에 포함된 자료들을 Grouping하는 기초적인 방법으로서 다양한 특성을 지닌 자료를 대상으로 상관성에 관계없이 측정치의 유사성의 정도를 판별하는 방법으로서 군집분석이라고도 한다. 집락분석의 접근방법은 상관관계(Correlation), 거리(Distance), 관계(Association) 및 확률적 접근방법(Probabilistic Measures) 등으로 부터 동질성 집단을 분류한다.

집약화하는 방법에는 각 대상자료 사이의 거리를 계산하여 군집하는 과정에서 어떠한 기준에 의해 거리를 산정하느냐에 따라서 계층적(Hierarchical)방법과 비단층적(Nonhierarchical)방법 및 평균과 표준편차에 의한 집약분석으로 나눌 수 있다.

3. 유역유출 시물레이션모형

본 연구에서는 하천유역의 홍수유출 시물레이션을 위하여 미육군공병단 사회사업부(U.S. Army Corps of Engineers, Civil Works Division, 1972)에 의해 개발되었으며, 낙동강유역의 홍수유출예측 연구(안, 1991, 1992)에서 그 적용성이 입증된 바 있는 시물레이션 모형인 SSARR모형을 선정하였으며 모형의 기본이론은 다음과 같다.

가. 모형의 기본이론

SSARR모형은 유역에서 발생하는 강우로부터 홍수추적을 위한 특수목적모형으로서 비교적 큰 유역에 대한 홍수예보와 저수지 운영을 위한 시물레이션모형으로서, 기능상 모형을 분류하면 유역유출(Watershed)모형, 하도유출(River Channel)모형 및 저수지운영조작(Reservoir Regulation)모형으로 구분된다.

한편, 모형에서 사용하고 있는 기본적인 추적 기법은 저류방정식의 연속방정식에 기초를 두

고있으며, 유역이나 하도상에서 상·하류의 유입량(I_1, I_2), 저류량(S_1, S_2) 및 유출량(O_1, O_2) 사이의 관계는 다음 식과 같으며,

$$\frac{1}{2} (I_1 + I_2)t - \frac{1}{2} (O_1 + O_2)t = S_2 - S_1 \dots\dots (4)$$

유입량 I_t 를 미분방정식의 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$I_t = O_t + dS/dt \dots\dots\dots (5)$$

또한, 저류량이 유출량의 함수인 자연호수에서는 $S = T_s O$ 이므로, 이를 시간 t 에 대하여 미분형으로 표시하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$I_t = O_t + T_s (dO/dt) \dots\dots\dots (6)$$

$$dO/dt = (I_t - O_t)/T_s \dots\dots\dots (7)$$

식(7)은 유역이나 하도가 일련의 작은 호수로 구성되어 있다고 가정하여 상류로부터 하류로 유출이 진행함에 따라서 자연적으로 지체되어 간다고 볼 수 있으므로 Fig. 2(a)와 같이 나타낼 수 있으며, 컴퓨터를 이용한 홍수추적에 있어서는 입력된 자료의 연속적인 계산회수에 따라서 반복시행하게 되므로 Fig 2(b)와 같이 정의할 수 있다.

Fig. 2에서 Δt 시간 동안의 평균유입량(식

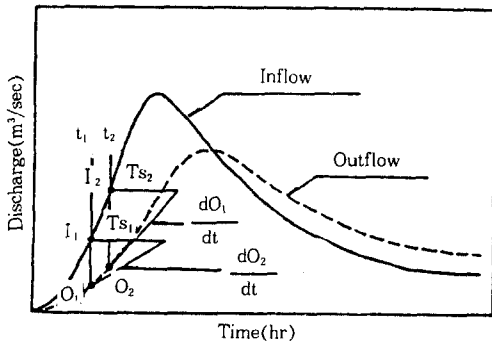


Fig. 2. (a) Conceptual Diagram of Basic Storage Routing Procedure

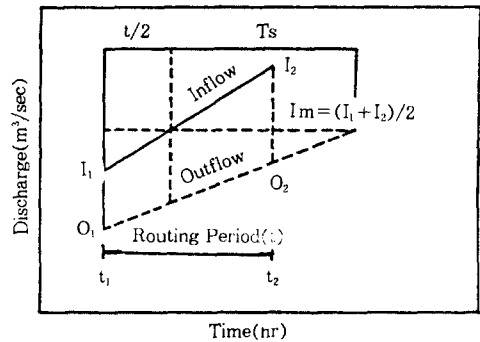


Fig. 2. (b) One Increment of Storage Routing

(8))을 저류방정식에 적용하면 식(9)와 같고

$$\frac{1}{2} (I_1 + I_2) = I_m \dots\dots\dots (8)$$

$$I_m t - \frac{1}{2} (O_1 + O_2)t = S_2 - S_1 \dots\dots\dots (9)$$

식(9)의 양변을 시간 t로 나누어 변형하면 식(10)과 같다.

$$I_m - O_1 = (O_2 - O_1) / t \{ [(S_2 - S_1) / (O_2 - O_1)] + \frac{1}{2} t \} \dots\dots\dots (10)$$

따라서 추적제산에 있어서 홍수말기의 유출량 (Q₂)은 평균유입량(I_m), 초기유출량(O₁) 및 저류시간(T_s)에 의해서 다음 식과 같이 정의된다.

$$Q_2 = \frac{I_m - O_1}{T_s + 0.5t} \cdot t + O_1 \dots\dots\dots (11)$$

나. 모형의 매개변수

하천유역의 홍수유출해석에 필요한 모형 매

개변수는 Table 1과 같이 구분할 수 있으며, 유출해석의 정도를 높이기 위하여 유역유출매개변수와 하도유출 매개변수로 나누어서 분류하면 Table 2와 같이 총 19개의 모형 매개변수로 정의할 수 있다.

1) 유역유출 매개변수

① 유역평균강우량

강우의 입력으로부터 유역 평균강우량을 산정하는 방법은 Thiessen방법에 의한 면적평균 강우량 산정원리와 같으며 식(12)와 같다.

$$PP_t = \frac{\sum_{i=1}^n (PP_{it} * W_i)}{n} \dots\dots\dots (12)$$

여기서,

PP_t ; t시간 동안의 유역의 면적평균 강우량

PP_{it} ; i(i=1,n)지점에 대한 t시간 강우량

W_i ; i(i=1,n)강우관측소의 면적 가중치

W_i ; i(i=1,n)강우관측소의 면적 가중치

② 유역의 증발산지수(ETI)

홍수시 유역유출해석 시스템을 구성하고 있

Table-1. Input Data Needed for Operation of the Flood Flow Simulation Model

Variables	Description
Non-Variable Characteristics	Basin Area, Reservoir Storage Capacity, Watershed Characteristics
Initial Conditions	Watershed-Runoff Indexes, Flow in Each Increment of Each Channel Reach, Initial Reservoir Elevation and Initial Reservoir Outflows
Time Variables	Precipitation Data, Air Temperatures, Streamflow Data, Reservoir Regulation Data, Other Hydrometeorological Elements
Job Control	Total Computation Period, Routing Intervals, Other Alternative Data

Table-2. Watershed and Channel Routing Model Parameters

Model	Parameters
Watershed Routing Model	Weighting Factor(W), Soil Moisture Index(SMI), Runoff Percentage(ROP), Baseflow Infiltration Index(BII), Baseflow Percentage(BFP), Total Input Rate to Surface & Subsurface Components(RGS), Surface Input Rate(RS), Factor for Reducing ETI on Rainy Days(KE), Rainfall Intensity(RI), Evapotranspiration Index(ETI), Maximum Value for BII(BIIMX), Time Delay or Time of Storage(TSBII), Maximum Subsurface Input Rate(KSS), Discharge Constant for the Watershed Routing Number(n), Time of Storage for the Watershed(Ts), Number of Increments for the Watershed Routing(Phase no.)
Channel Routing Model	Discharge Constant for the Watershed Routing Number(n), Time of Storage for the Watershed(Ts), Number of Increments for the Watershed Routing(Phase no.)

는 각 소유역별 증발산량을 산정하기 위하여 본 연구에서는 월별 실제 증발산량(ETI_i)을 이용하였다. 그러나 월별평균 일증발산지수 ETI를 사용할 경우 다음 식(7)에서 나타낸 바와 같이 임의 시각에서의 SMI에 영향을 미치며, 토양습윤량을 감소시키는 증발산의 영향을 나타내는 계수 KE는 강우강도 RI에 따라서 좌우되므로 증발산지수의 계산시 신중을 기해야 한다.

③ SMI-ROP

유출수문곡선에 가장 큰 영향을 미치는 매개변수들 중의 하나인 SMI-ROP의 관계는 유출 용적뿐만 아니라 유출 시간적 분포 표시하는 유출수문곡선의 모양을 좌우하게 되며, 매개변수의 정의과정은 다음과 같다.

㉠ 총유출량(RGP)의 결정

호우시 강우의 입력으로 인한 유출량의 결정은 총유출량이 유역의 유출율에 비례한다는 가정하에 식(13)과 같이 정의된다.

$$RGP = ROP * MI \dots\dots\dots(13)$$

여기서, ROP ; 유출율(Runoff percent)

MI ; 임의의 기간에 발생한 강우량으로부터 입력되는 습윤량

㉡ 토양습윤량과 蒸發散量(SMI-ET)의 關係
호우의 발생으로 인한 t시각의 SMI는 (t-1)시각의 SMI에 침수손실량을 합한 값으로 계산하며 식(14)와 같이 정의할 수 있다.

$$SMI_2 = SMI_1 + (WP - RGP) - (PH * KE * ETI / 24) \dots\dots\dots(14)$$

여기서,

- SMI₁ ; 초기 토양습윤지수(t-1 시간)
- SMI₂ ; 말기 토양습윤지수(t-1 시간)
- PH ; 시간간격(hour)

WP ; 면적 평균강수량(cm)

KE ; 강우시 일별 증발산량 감소 지수

④ 기저유출침투지수(BII)

기저유출침투지수는 W, SMI 및 ETI에 대한 조정에 의해 실측 유출수문곡선의 유출용적에 근접한 계산 유출용적을 얻은 다음에 총 유출을 기저유출, 지표면유출 및 지표하유출 성분으로 분리하여 계산 한다.

먼저, 호우발생으로 인한 BII의 결정을 위한 기본식은 다음 식(15)와 같으며, 계산된 임의 시각의 BII가 BIIMX 보다 클 경우에 BII는 BIIMX로 한다. 또한 BII의 변화량을 계산하기 위하여 필요한 유역의 저류시간이나 지체시간(BIITS)은 30~60시간으로 한다.

$$BII_2 = BII_1 + (24 RG - BII_1) \frac{PH}{BIITS + PH/2} \dots\dots\dots(15)$$

여기서,

BII₁ ; 초기 기저유출침투 지수(cm/day)

BII₂ ; 말기 기저유출침투 지수(cm/day)

RG ; 단위시간당 유출량(cm/hr)

BIITS ; BII계산을 위한 지체시간(30~60hr)

BIIMX ; 최대BII(cm)

다음으로, 총기저유출량(TBF)은 식(16)과 같이 유출량에 기저유출율(BFP)을 곱한 관계(BFP*RG)로 정의하였다.

$$TBF = BFP * RG \quad (\text{if } TBF \geq BFLIM, \\ TBF = BFLIM) \dots\dots\dots(16)$$

여기서,

BFLIM ; 기저유출량의 한계치

그리고 홍수발생으로 인한 지하수유출량은 TBF중에서 단시간내에 하도로 유출하는 기저유출량과는 달리 장시간 지면하에 저유되었다가 하도로 유출되는 량으로 정의하였으며, 식

(17)과 같이 정리할 수 있다. 이때 계산된 하층유출량(Lower Zone Flow : LZ)이 하층유출한계치(Maximum Input Rate to Lower Zone Routing : DGWLIM) 보다 클 경우 LZ는 DGWLIM으로 하여 계산한다.

$$LZ = TBF * PBLZ \dots\dots\dots (17)$$

여기서,
PBLZ; 하층유출추적을 위한 총기저유출을 마지막으로, 기저유출량(BF)은 식(18)과 같다.

$$BF = TBF - LZ \dots\dots\dots (18)$$

⑤ 지표면 및 지표하유출(RGS)

홍수시 총유출에서 기저유출을 제외한 지표면 및 지표하 유출 입력성분으로부터 지표수 유출성분과 지표하 유출성분을 각각 분리시키기 위해서 하도의 유출에 직접적인 영향을 미치는 홍수유출량은 식(19)와 같다.

$$RGS = RG - TBF = RG(1.0 - BFP) \dots (19)$$

또한 지표면유출(RS)과 지표면(RS) 및 지표하(RSS)유출(RGS)의 관계설정을 위하여 일반적으로 최소 지표면유출성분은 총유출량의 10% 이상이어야 하며, 지표하 유출성분은 지표면 유출성분과 같아질 때 최대치(KSS)에 도달하게 되고 그 이후에는 일정하게 된다는 가정하에서 RS의 계산은 식(20)과 같다.

$$RS = [0.1 + 0.2 \cdot (RGS/KSS)] \cdot RGS \dots (20)$$

if $RS > KSS, RSS = KSS$

2) 하도유출 매개변수

자연하도에서의 홍수추적은 기본추적방정식에 의하며, 유출량의 계산에 필요한 매추적당

저유시간 T_s 를 결정하는 방법으로는 경험식에 의한 방법과 저유시간(T_s)-유출량(Q)관계 수치표를 사용하는 방법이 있다. 경험식에 의해 T_s 를 계산할 경우는 추적변수인 n과 KTS값을 유사한 하도구간에서 실측자료로부터 결정한 값을 초기치로 택하여 시행착오적으로 최적값을 얻게 된다. 하도유출매개변수는 크게 3가지로서 유출 추적회수(Phase no.), 추적변수 n 및 매추적당 저유시간 T_s 으로 나눌 수 있으며, 하도추적의 기본식은 식(21)과 같다.

$$TS = KTS/Q^n \dots\dots\dots (21)$$

Ⅲ. 홍수시 유출예측시스템 모형의 적용분석

1. 분석유역 및 시스템의 구성

본 연구에서는 홍수유출예측시스템 모형의 개발을 위하여 낙동강유역을 대상으로 하였다. 낙동강유역에는 현재 5개의 댐(안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐, 영천댐)과 염해방지를 위하여 하구언이 건설되어 운용 중에 있으며 대천댐이 건설 중에 있다. 또한 낙동강유역에는 홍수시 유출예측을 위하여 56개 T/M 강우 관측소와 44개의 T/M수위국이 설치되어 유역의 홍수관리에 이용되고 있다.

홍수유출시스템의 개발을 위하여 유역의 지형특성, 하도상황, 토지이용 및 홍수 관리상태에 따라서 Fig. 3과 같이 24개 소유역(분류: 6개 유역, 지류: 18개 유역)과 15개 하도구간(분류: 9개 구간, 지류: 6개구간)으로 분할하고 4개의 다목적 댐저수지(안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐)로 시스템을 구성하였으며, 영천댐과 운문댐은 홍수조절용 목적의 댐이 아닐 뿐 만 아니라 저류능력이 다른 댐에 비하여 상대적으로 작으므로 본 연구에서는 소유역(No. 11 및 No. 22 유역) 유출로 구성하였다.

또한 남강댐의 경우는 홍수시 사천방수로의 유수전환을 고려하였으며, 본류 주요 수위표 지점의 유출량 검토를 위하여 비교적 장기간의 유출량 자료가 수집·보관되고 있는 왜관, 적포교 및 진동 수위표지점을 선정하였다.

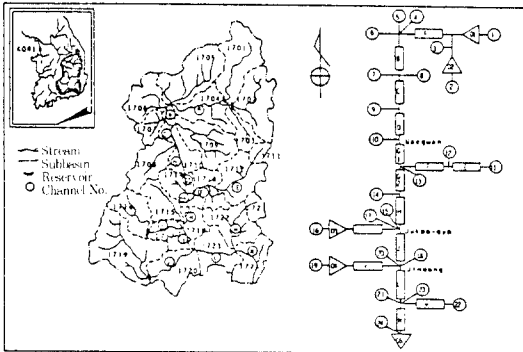


Fig. 3. System Diagram for the Floodflow Simulation System in Nakdong River

2. 강우예측시스템 모형의 결정

본 연구에서는 기왕에 발생한 1975~92년까지의 주요 호우시에 기상대 및 유역내 T/M 강우관측소에서 관측된 기상특성자료와 호우 특성자료로부터 호우예측 시스템모형을 결정하였다.

먼저, 기상인자회귀모형에 의한 강우예측 시스템모형의 매개변수 결정을 위하여 주요호우시의 기상특성과 호우 간의 인자간 상관분석을 실시하였다. 그 결과 단기 호우예측에 영향을 미치는 인자는 일평균기온, 일평균해면기압, 24시간 기압변화량 및 운량인 것으로 분석되었으며 이들 기상인자를 이용한 다중회귀분석을 실시하여 기상인자회귀모형을 결정하였다. 또한, 모형에서 사용되는 매개변수의 예측을 위하여 시계열해석이론을 기초로 AR(1)모형, AR(2)모형 ARMA(1, 1)모형 및 ARMA(2, 1)모형에 대하여 분석한 결과 ARMA(2, 1)모형이 최적 매개변수 예측모형으로 분석되었으므로 기상인자예측에서는 이를 분석에 이용하였다.

다음으로, 다변량모형에 의한 실시간 호우 예측에 필요한 모형 매개변수는 예측강우에 대한 평균과 분산, 정규 잔차의 공분산 및 강우의 진행속도와 방향 등에 대한 추정이 필요하므로 이들 매개변수를 기왕에 발생한 호우사상을 대상으로 시각별 등우선도를 작성하여 호우의 이동중심을 추정하였다. 그 결과 호우시 강우의 발생특성 및 강우의 이동특성에 대한 관계를 결정할 수 있었으며, 강우의 분포특성을 규명하여 이 결과로부터 다변량모형의 보정을 수행하였다.

마지막으로, 지역별 예상강우량 예측모형의 결정을 위하여 지점별 강우량의 평균 및 표준편차에 의해서 시간별 강우권역을 분석하였다. 그 결과 낙동강유역의 호우는 3개의 권역으로 분석되었으므로 이들 권역에 대한 각 권역별 호우예측모형을 개발하여 홍수예측모형에 적용하였다.

따라서, 이들 강우예측모형을 이용한 강우예측을 실시한 결과 3모형 모두 실제호우사상에 근접함을 알 수 있었으므로, 이들 모형을 홍수유출예측모형구축에 이용토록 하였다.

3. 홍수유출 시뮬레이션 시스템 모형의 매개변수 결정

홍수유출 시뮬레이션시스템 모형 매개변수의 최적화를 위하여 유역내에서 기왕에 발생한 호우자료를 이용하여 최적 모형 매개변수를 결정하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같다.

다음으로, 이들 매개변수의 변화가 유출에 미치는 영향을 분석하기 위하여 추정된 매개변수(Fig. 4)를 기준으로 $-15\% \sim +15\%$ 까지 변화시켜가면서, 민감변수의 변화에 따른 민감도분석을 실시하였다. 분석에 사용된 방법은 모형의 효율도(Model Efficient; ME), 절대오차의 평균(Mean Square Error; MSE), 상대오차의 평균을 나타내는 편기율(Bias) 및 체적오차의 백분율(Volume Error; VER) 등을 분석

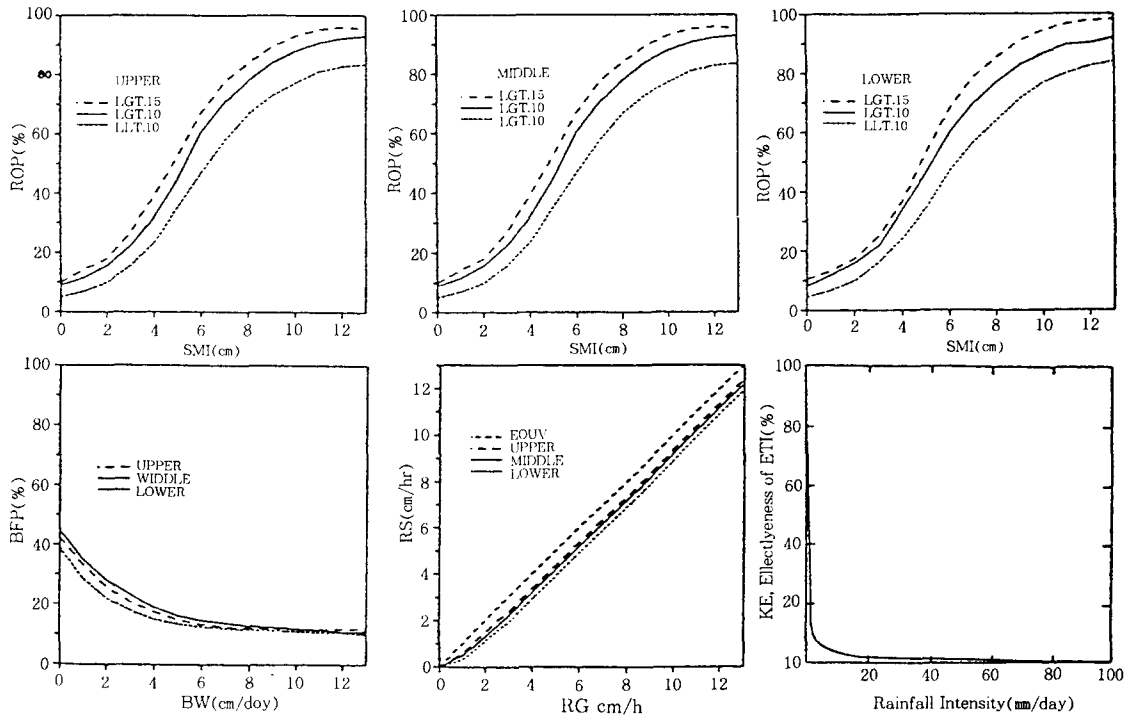


Fig. 4. Optimal SSARR Model Parameters

하였다. 그 결과 각 매개변수의 변화에 따른 유출수문곡선의 변화양상은 Table-3과 같다.

4. 홍수유출 시뮬레이션 모형의 적용 분석

본 연구에서는 다목적 댐저수지군의 최적연계운영을 고려한 홍수유출예측 시스템 구축을 위한 기초적 연구를 위하여, 지금까지 분석된 최적 홍수유출 시뮬레이션 모형 매개변수를 이용하여 유역내에 발생한 실제호우사상을 대상으로 댐저수지 유역의 유입량에 대한 홍수유출 시뮬레이션을 실시하였다.

낙동강유역내에 최근 11년(1982~92년)간 발생한 호우사상은 많이 있으나 비교적 큰 홍수유출을 발생시킨 호우사상은 약 10여개에 불과하였으므로 이들 호우사상 중에서 비교적 정밀한 강우-유출량 관측자료가 있는 6개의 호우사상을 대상으로 시뮬레이션모형에 의한

홍수시 댐저수지 유입량을 분석하였다.

분석 대상호우의 선정에 있어서는 안(1992)에 의해 낙동강유역의 대표적인 호우진행경로로 태풍/저기압형 호우는 유역의 남해안에서 진입하여 북쪽으로 진행하며, 전선형 호우는 유역의 서쪽에서 진입하여 동해안으로 진행하는 것으로 분석된바있으므로 태풍/저기압형 호우는 1991년 8월 22일에 발생한 태풍 글래디스호를 선정하고 전선형 호우는 1990년 7월 14일에 발생한 호우로 하였다. 다음으로, 그 외의 호우 진행 경로 중에서 비교적 그 발생 빈도가 높은 집중호우의 형태로서 1984년 8월 31일 호우(전선형, 서→북동), 86년 8월 29일 호우(전선형, 북→남), 87년 8월 25일 호우(전선형, 북서→남) 및 89년 7월 25일 호우(태풍/저기압형, 남→북)를 선정하여 당시의 저수지 상태를 고려하여 홍수유출예측을 실시 하므로써 계속되는 연계운영방안 연구에서 이

Table-3. Results of Sensitivity Analysis of Model Parameter Variation

(Units : CMS)

Parameter		15%	+10%	+5%	0%	-5%	-10%	-15%
W_i	ME	0.828	0.857	0.905	0.992	0.924	0.897	0.846
	MSE	259.463	237.238	192.649	167.208	172.136	201.055	245.462
	BIAS	27.350	25.007	20.307	17.625	18.145	21.193	25.874
	VES	19.217	17.254	12.039	3.534	6.046	8.435	17.312
SMI-ROP	QER	21.455	14.545	2.273	6.364	8.273	28.364	34.909
	ME	0.891	0.903	0.928	0.992	0.938	0.925	0.899
	MSE	365.317	344.632	295.898	167.208	275.399	303.025	352.024
	BIAS	44.631	42.104	36.150	17.625	33.645	37.020	43.007
BII-BFP	VES	14.391	13.643	9.353	3.534	4.490	5.733	11.288
	QER	17.455	14.545	12.000	6.364	8.727	20.364	24.000
	ME	0.950	0.955	0.964	0.992	0.967	0.962	0.953
	MSE	411.748	393.348	351.640	167.208	336.065	360.247	403.209
RGS-RS	BIAS	50.303	48.055	42.960	17.625	41.057	5.624	49.260
	VES	11.058	10.726	7.889	3.534	4.424	15.727	10.815
	QER	17.455	16.364	15.636	6.364	13.818		16.636
	ME	0.969	0.972	0.977	0.992	0.979	0.976	0.970
KE-RI	MSE	469.014	445.733	402.301	167.208	387.690	412.225	458.232
	BIAS	57.299	54.455	49.149	17.625	47.364	50.361	55.982
	VES	10.364	9.941	7.496	3.534	5.568	8.536	9.647
	QER	24.364	17.273	11.273	6.364	17.818	20.727	24.727
T_s	ME	0.979	0.980	0.984	0.992	0.984	0.983	0.980
	MSE	506.381	485.053	445.266	167.208	432.181	454.313	496.391
	BIAS	61.864	59.259	54.398	17.625	52.799	55.503	60.644
	VES	9.431	9.106	7.103	3.534	3.664	1.524	0.970
Phase No.	QER	14.545	10.545	4.545	6.364	4.545	10.545	14.545
	ME	0.979	0.980	0.983	0.992	0.984	0.982	0.979
	MSE	466.981	350.038	218.726	167.208	209.376	327.702	462.482
	BIAS	49.224	37.438	24.138	17.625	23.152	35.084	48.750
KTS	VES	8.493	8.342	6.790	3.534	4.224	5.624	7.780
	QER	15.636	15.273	14.909	6.364	13.091	13.455	14.182
	ME	0.988	0.988	0.990	0.992	0.990	0.990	0.988
	MSE	586.148	364.785	227.975	167.208	213.222	331.964	570.389
n	BIAS	72.150	59.520	24.989	17.625	23.173	55.480	70.210
	VES	8.023	7.921	6.603	3.534	4.437	5.619	7.543
	QER	27.639	18.859	14.775	6.364	16.605	19.867	27.825
	ME	0.990	0.990	0.991	0.992	0.992	0.991	0.990
n	MSE	318.381	297.529	262.857	167.208	247.290	264.585	300.239
	BIAS	46.117	33.551	29.283	17.625	27.367	39.496	43.884
	VES	7.715	7.631	6.469	3.534	4.583	5.616	7.069
	QER	16.727	16.000	16.000	6.364	13.818	14.545	16.000
n	ME	0.989	0.990	0.991	0.992	0.991	0.990	0.989
	MSE	246.086	226.725	194.251	167.208	100.644	100.419	200.821
	BIAS	29.528	27.144	23.147	17.625	21.472	23.537	27.772
	VES	7.492	7.417	6.374	3.534	4.693	5.661	6.461
n	QER	14.727	14.455	13.818	6.364	13.273	14.000	14.727

용될 수 있도록 분석하였다.

따라서 본 연구에서 결정된 유출시물레이션 모형 매개변수를 이용하여 실제호우시의 댐저수지별 유입량 시물레이션을 실시한 결과 Table-4. 및 Fig. 5와 같았으며, 분석결과로 볼 때 본 연구에서 결정된 홍수유출시물레이션모

형 매개변수를 이용하여 유출 시물레이션을 실시할 경우에 실측치와 근접한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

Table-4. Comparison of Reservoir Inflow Characteristic By Flood-Flow Simulation Model

Storm		Factors	Andong	Imha	hapchun	Namkang
1987 8.25	OBSERVED	I_p (CMS)	952.0	901.0	559.0	973.0
		t_p (hr)	8. 26 : 13 : 30	8. 26 : 13 : 30	8. 26 : 11 : 30	8. 26 : 15 : 30
	SIMULATION	I_p (CMS)	968.0	898.0	576.0	984.0
		t_p (hr)	8. 26 14 : 00	8. 26 14 : 00	8. 26 11 : 00	8. 26 14 : 00
1990 7.14	OBSERVED	I_p (CMS)	813.0	841.0	982.0	1,487.0
		t_p (hr)	7. 18 : 16 : 00	7. 18 : 17 : 00	7. 16 : 00 : 00	7. 16 : 11 : 00
	SIMULATION	I_p (CMS)	920.0	988.0	1,000.0	1,560.0
		t_p (hr)	7. 18 17 : 30	7. 18 18 : 00	7. 16 03 : 00	7. 16 08 : 00
1991 8.22	OBSERVED	I_p (CMS)	1,400.0	1,657.0	778.0	2,198.0
		t_p (hr)	8. 23 : 23 : 00	8. 23 : 22 : 30	8. 23 : 21 : 00	8. 23 : 20 : 00
	SIMULATION	I_p (CMS)	1,450.0	1,630.0	783.0	2,270.0
		t_p (hr)	8. 23 23 : 30	8. 23 23 : 00	8. 23 21 : 00	8. 23 21 : 00

Notes) I_p : Peak Discharge(CMS), t_p : Peak Time(hr)

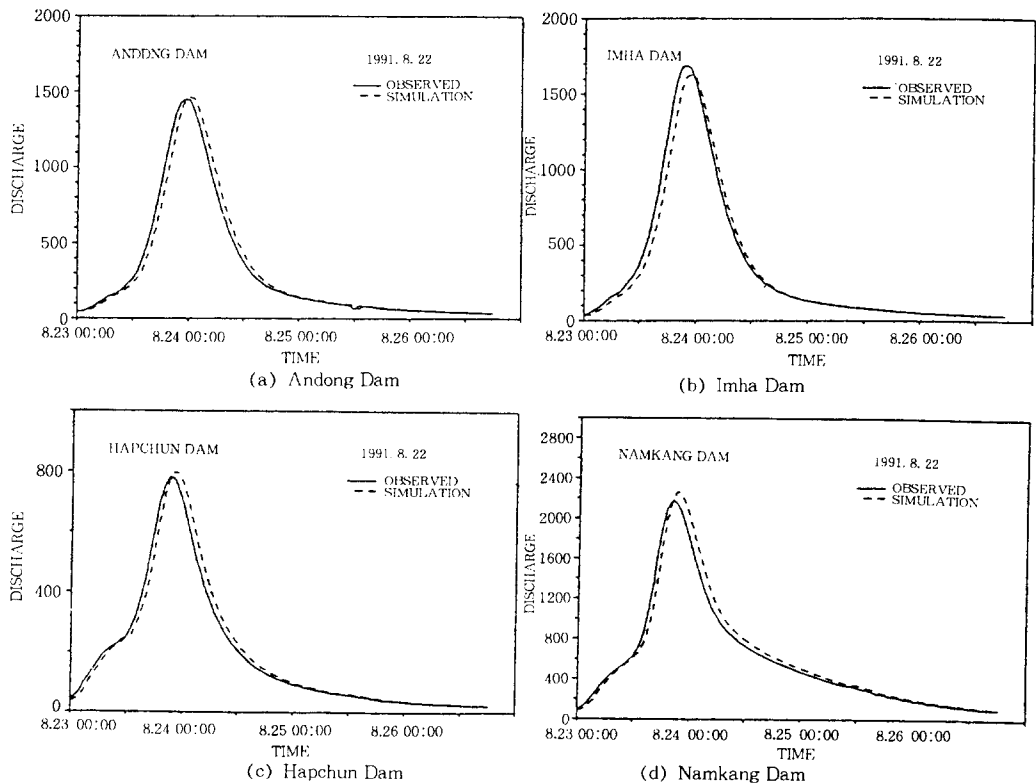


Fig. 5. Comparison of Reservoir Inflow Characteristic By Flood-Flow Simulation Model(Actual Storm ; 1991. 8. 22)

IV. 결 론

본 연구에서는 홍수시 유출예측 연구를 위하여 시물레이션모형인 SSARR모형을 기본모형으로하여 실제호우사상과 예상강우량사상을 이용한 홍수유출예측시스템을 수행할 수 있도록 강우예측 및 저수지운영을 위한 Subprogram을 개발하여 관측 및 텔레미터링 시스템, 강우예측 및 데이터 뱅크 시스템, 홍수유출 시물레이션 시스템, 댐운영 시물레이션 시스템, 홍수예측 시물레이션 시스템 및 홍수경보 시스템으로 구성된 홍수시 물관리시스템모형 및 그 알고리즘을 개발하였다.

1. 강우예측시스템모형으로서는 다변량모형과 기상인자회귀모형 및 지역별 예상강우모형을 개발하였으며, 그 결과 다변량모형에 의한 강우예측 결과가 실제의 호우사상에 가장 접근함을 알 수 있었다.

2. 기상인자회귀모형의 개발에 있어서는 강우량에 영향을 미치는 인자로서 평균해면기압, 일평균해면기압의 변화량, 일평균기온 및 운량인 것으로 밝혀졌으며, 이들 기상인자에 대한 예측 시계열모형을 개발하였다. 또한 강우권역구분 결과 낙동강유역의 호우는 3개의 권역으로 구분됨을 알 수 있었다.

3. 홍수유출 시물레이션을 위하여 최적 유출매개변수를 결정하였으며, 결정된 매개변수의 변화특성분석과 민감도분석을 실시한 결과, 모형 매개변수가 유출수문곡선의 첨두홍수량은 물론 첨두발생시간에 민감한 영향이 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Mays, L.W., O. Unver and K. Lansey(1985), Real-Time Flood Management Model for Lower Colorado River-Highland Lake System, Techni. Report, Center for Research in Water Resources, The University of Texas at Austin.
2. Dapei Wang & Barry J.Adams(1986), Optimization of Real-Time Reservoir Operations with Markov Decision Processes, WRR, Vol. 22, No.3, pp.345~352.
3. Unver, O.(1987), Simulation & Optimization of Real-Time Operations of Multi-reservoir Systems under Flooding Conditions, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, Texas.
4. David H. Marks(1987), A New Method for Real-Time Operation of Reservoir Systems, WRR, Vol. 23, No.7, pp.1376~1390.
5. T.R. Ginn & Mark H. Houck(1989), Calibration of an Objective Function for the Optimization of Real-Time Reservoir Operations, WRR, Vol. 25, No. 4, pp.591~603.
6. 안승섭(1992), 홍수유출 Simulation에 의한 댐저수지군의 최적연계운영 및 홍수예측 모델, 영남대학교 박사학위논문.
7. 안승섭, 이순탁, 지홍기(1993), 하천유역의 홍수유출해석, 대한토목학회 학술발표회 논문집.
8. Ahn Seungseop & Soontak, Lee(1994), Flood-Flow Simulation Model of River Basin, 8th IWRA World Congress on Water Resources, Cairo Egypt.
9. 안승섭, 이순탁, 지홍기(1991), 하천유역의 홍수유출 Simulation, 대한토목학회 학술발표회 논문집.
10. 안승섭, 이순탁, 지홍기(1992), 유역유출모형과 매개변수의 변화특성, 한국수문학회 수공학연구 발표회 논문집.
11. 박승우, 박창언(1994), 영산호운영을 위한 홍수예경보모형의 개발(1) - 나주지점의 홍수유출 - 추정 -, 한국농공학회지, Vol. 36, No.4, pp.95~102.

12. 박승우, 박창언(1995), 영산호운영을 위한 홍수예경보모형의 개발(II)-나주지점 하류유역에서의 홍수유출 추정-, 한국농공학회지, Vol.37, No.1, pp.65~72.
13. Box, G.E.P. and G.M. Jenkins(1970), Time Series Analysis, Forecasting and Control, Holden-Day, San Francisci.
(접수일자 : 1995년 4월 20일)