

## 댐 放流時 下流水位 및 主要 河道區間別 洪水到達時間의 豫測

윤 상남\* 박 무중\*\*

### 1. 서론

대규모 댐에서 洪水를 放流할 때 下流의 主要地點까지 洪水가 到達하는데 소요되는 時間 (travel time of flood peak) 과 下流水位는 洪水豫警報시스템이라든지 都市雨水排除시스템, 河川汚染物質의 除去施設 및 河川水文觀測網의 운영과 管理를 위해 대단히 重要하다.

河川에서의 洪水到達時間은 일반적으로 유속에 反비례하는 것으로 河道의 水理學적 特性과 洪水 량의 크기에 依해 좌우된다. 本 연구에서는 다목적 댐구간에서 방류량의 크기에 따른 홍수도달시 간과 주요지점에서 의 홍수위를 추적하여 그 결과를 사용하여 실무에 적용할수 있는 모형을 제안 하고자 한다.

홍수방류시 상류댐으로부터 하류댐 까지의 洪수도달시간과 하류 입의지점에서 의 洪수위변동의 예측을 위해서는 부정류인 洪수파의 전파양상을 우선적으로 계산해야한다. 이를 위해 本 연구에서 는 洪수류의 연속방정식과 운동방정식을 초기조건과 경계조건에 맞추어 수치해석적으로 푸는 이른바 수리학적 홍수추적방법을 사용 하였다.

### 2. 댐 區間洪水到達時間의 定義

일반적으로 洪水到達時間 (travel time) 은 河道의 어떤구간을 洪水波가 통과하는 데 소요되는 시간으로 정의되며 上流端에서의 홍수수문곡선의 尖頭流量발생시각에서부터 하류단 통과 洪수수문 곡선의 첨두유량발생시각까지의 時間長徑으로 代表되거나, 혹은 上下流端 洪수수문곡선의 質量 重心 時間간의 시간간격으로 대표되기도 한다. 그러나, 상류댐으로부터 홍수를 放流할 경우 하류댐

\* 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

\*\* 고려대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정

地點까지의 洪水到達時間에 대해서는 아직 구체적으로 정의된 바 없으며 통상적인 개념의 홍수도달 시간과는 상이하므로 그림 1 에서와 같이 정의 하기로 한다.

그림 1 에서와 같이 댐 구간내의 初期 하도유출 조건하에서 上流댐의 여수로 수문을 개방하여 최대 방류량에 도달한 직후 水門을 다시 폐쇄하여 초기 유출상태로 복귀할 경우 (瞬間放流)의 홍수도달시간은 통상적인 概念의 洪水波 전파시간  $t_1$  으로 정의키로 한다. 그러나 대부분의 경우 홍수시 댐 放流는 댐 여수로의 수문을 어떤 開度로 상당시간 개방하여 繼續放流하는 것이 통상이며, 이 경우 그림 1 에 표시한 바와 같이 最大放流 始點時刻으로부터 하류댐으로 부터의 尖頭放流 (最大貯水位) 時刻까지의 時間長徑  $t_2$ 를 洪水到達時間으로 정의 하기로 한다.

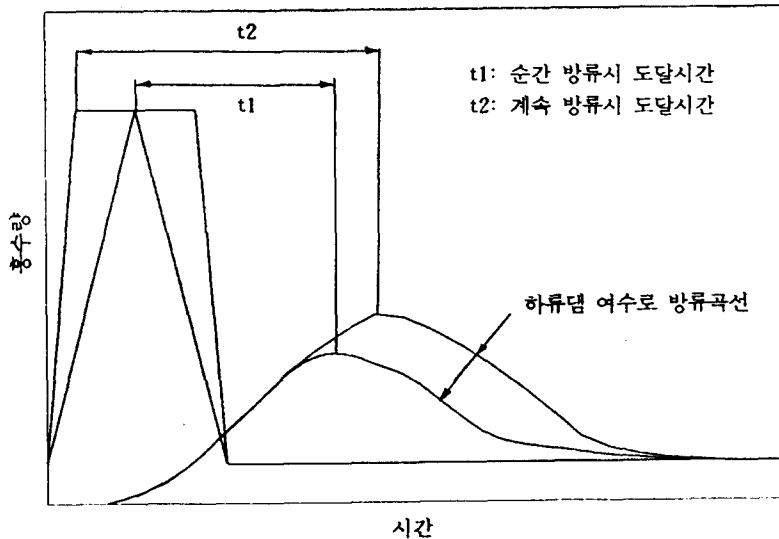


그림 1 홍수도달시간의 정의

### 3. 대상유역 및 적용

#### 3.1 對象河川區間

洪水時 댐 放流로 인한 下流水位와 洪水到達時間의 推定을 위한 對象河川區間은 화천댐-춘천댐, 춘천댐-의암댐, 의암댐-청평댐, 청평댐-팔당댐, 소양강댐-의암댐 및 충주댐 - 팔당댐 의 6개 區間이며 表 1 은 각 구간의 特性諸元을 표시하고 있다.

#### 3.2 댐 區間 洪水到達時間에 영향을 미치는 因子分析

상류 댐으로 부터의 방류에 의한 댐 구간 홍수도달시간은 자연하천에서의 홍수파의 전파와는 달리 여러가지 인자에 의해 영향을 받을 것으로 판단된다. 첫째로, 댐 放流를 시작하기 이전의 河道

表 1 對象河川區間の 特性

區間	區間距離 (Km)	最深河床 (El. m)	區間 標高差 (m)	河床傾斜
화천댐-춘천댐	33.20	108.40 74.50	33.90	0.001020
춘천댐-의암댐	19.40	74.50 54.71	19.79	0.001020
의암댐-청평댐	43.80	54.71 22.30	32.41	0.000740
청평댐-팔당댐	26.50	22.30 11.70	10.60	0.000400
소양강댐-의암댐	21.50	81.20 54.71	26.49	0.001232
충주댐-팔당댐	107.05	64.95 11.70	53.25	0.000497

자료 : 北漢江 河川 調査 報告書, 建設部, 1990. 8

北漢江·昭陽江 河川 整備基本計劃, 建設部, 1990. 12

內 初期 流量條件을 들 수 있으며, 둘째로는 최대방류량의 크기, 셋째로는 放流繼續時間, 넷째로는 下流 댐 여수로의 水門開度, 마지막으로는 하도구간으로 유입하는 側方流入量등을 들 수 있다. 이들 因子中 側方流入量의 영향은 洪水時 支流流域의 降雨및 流出特性에 따라 各樣의 영향을 미칠 것이므로 確立적인 傾向을 분석하기가 어려워 本 研究에서는 일단 고려하지 않기로 하였으며, 나머지 人字들의 영향에 대하여 각각 살펴본 결과는 다음과 같다.

### 3.2.1 河道內 初期放流條件의 영향

洪水時 河道內 초기유량은 發電放流量과 河道區間の 基底流量으로 구성되며 洪水放流量의 일반적 크기에 비해 상대적으로 작으므로 下流댐의 流出量에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 예상하였으며 계산결과중 화천댐-춘천댐 구간에 대한 계산예를 보면 그림 2 와 같다. 그림 2 에서 보는 바와 같이 화천댐의 수문을 30분에 걸쳐 개방하여 5,000 m<sup>3</sup>/sec 로 1 시간 방류한 후 30분에 걸쳐 수문을 완전 폐쇄할 경우 춘천댐의 수문 완전개방시 초기유량이 증가함에 따라 洪水到達時間이나 尖頭放流量의 크기에 큰 변화를 주지 못하고 있음을 알 수 있다.

### 3.2.2 下流댐 餘水路 水門開度の 영향

댐 區間 洪水到達時間은 上流댐의 放流量이 일정할 때 下流댐의 餘水路 水門開度の 크기에 따라 상당한 영향을 받는 것으로 나타났다. 그림 3 은 화천댐-춘천댐 구간에 대해 화천댐으로부터 4,500 m<sup>3</sup>/sec 로 2 時間동안 방류할 경우 水門開度を 각각 12m (1m × 12門), 24m (2m × 12 門) 및 完全

開放 했을 경우의 춘천댐 방류량곡선을 표시하고있다.

그림 3 에서 볼수있는 바와같이 수문을 완전개방할 경우에는 저수지를 포함하는 댐 河道區間の貯溜效果가 약화되어 洪水到達時間이 짧아지면서 下流댐의 尖頭放流量이 커지나 水門開度가 감소할 수록 댐 河道區間の 저류효과가 증가되어 홍수도달시간은 길어지면서 尖頭방류량은 작아지는 것으로 해석된다.

水門開度の 조건은 수없이 많은 경우로 나누어 생각해야 하므로 以下の 홍수도달시간계산에서는 모든 댐 區間に 대하여 下流댐 여수로의 完全開放條件을 전제로 하였다. 다만, 팔당댐의 경우는 滯堰의 특성상 水門完全開放의 경우란 있을수 없으며 실제로 저수지의 수위를 일정 범위(EL. 24.5 ~ 26.0m) 내에 유지할수 있도록 水門開度를 조절하여 방류하고 있으므로 下流端의 境界條件으로는 貯水位 EL. 25.5 m 로 일정하다는 가정하에 계산하였다.

### 3.2.3 上流댐 放流量의 크기와 放流時間의 영향

댐구간 洪水到達時間은 다른 조건이 일정할 경우 上流댐의 放流量의 크기가 증가함에따라 감소하는 성향으로 나타났으며 화천댐-춘천댐 구간에 대한 計算例는 그림 4 및 그림 5 에 표시한 바와같다.

그림 4 에서 보는 바와같이 上流댐으로부터의 放流量을  $4,000\text{m}^3/\text{sec}$  로 일정하게 유지하면서 방류시간을 증가시키면 下流댐 에서의 尖頭放流量의 크기는 증가하며 발생시각또한 늦어져서 댐 區間 洪水到達時間이 길어짐을 알 수 있다.

또한, 그림 4 과 그림 5 을 비교해보면 방류량을  $4,000\text{m}^3/\text{sec}$  에서  $5,000\text{m}^3/\text{sec}$  로 증가시키면서 동일 放流時間동안 방류하면 洪水到達時間은 짧아짐을 알 수 있다. 이는 最大放流量이 커짐에 따라 洪水波의 區間 전파속도가 빨라지기 때문인 것으로 생각된다. 이상과 같은 홍수도달시간-방류량-방류시간 관계를 고려하여 나머지 댐 구간에 대하여 부정류 계산으로 이들 관계를 수립하였다.

## 4. 댐 區間別 上流댐 放流量-放流繼續時間-洪水到達時間 關係의 분석

이상에서 언급한 댐 구간의 洪水到達時間에 미치는 영향因子들을 고려하여 댐 區間別로 上流댐의 放流條件, 下流댐 境界條件및 河道의 初期條件下에 不定流 計算을 실시 하였으며 계산결과 얻어진 區間別 上流댐 放流量( $Q_0$ )-放流繼續時間( $t_0$ )-洪水到達時間( $t_p$ )-下流端 尖頭流量( $Q_p$ ) 관계자료중 화천댐-춘천댐구간의 계산결과를 표 2 에 수록하였다. 팔당댐의 경우 실제 홍수 상황하에서는 저수지의 홍수유입량을 고려하여 저수위를 EL. 24.5 ~ 26.5m 의 범위내에 유지할 수 있도록 댐 수문의 개도를 조절하여 홍수를 방류하게 되어 있으므로 댐 단면에서의 下流端 境界條件으로는 貯水位 EL. 25.5m 로 일정하게 유지하는 것으로 하였다.

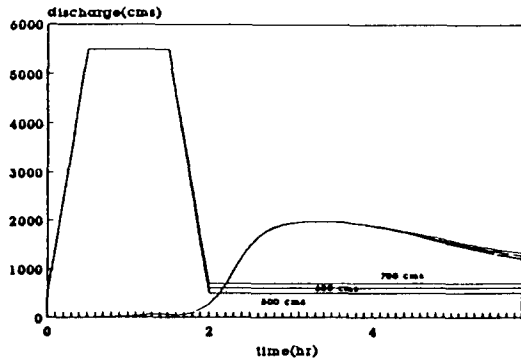


그림 2 하도내 초기유량의 영향  
(화천댐-춘천댐 구간)

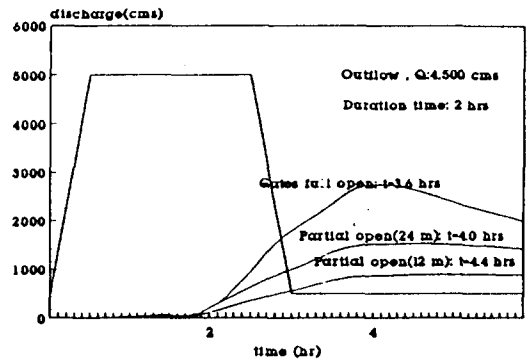


그림 3 하류댐 여수로의 수문개도 영향  
(화천댐-춘천댐 구간)

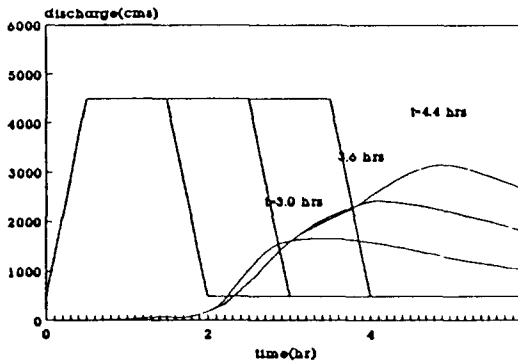


그림 4 상류댐 방류시간의 영향  
(화천댐-춘천댐 구간: 방류량 4,000 cms)

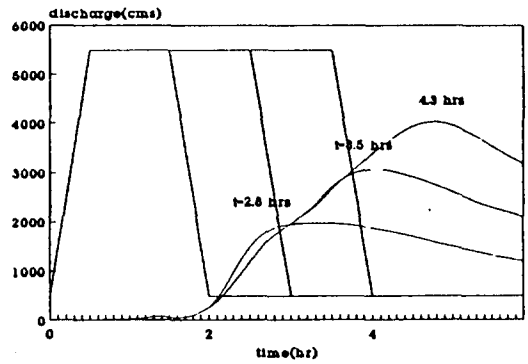


그림 5 상류댐 방류시간의 영향  
(화천댐-춘천댐 구간: 방류량 5,000 cms)

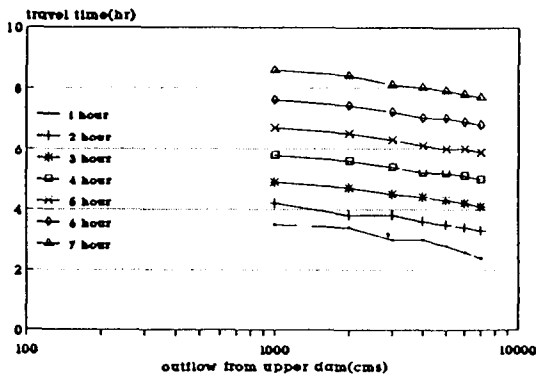


그림 6 홍수도달시간-방류량-방류계속시간  
(화천댐-춘천댐)

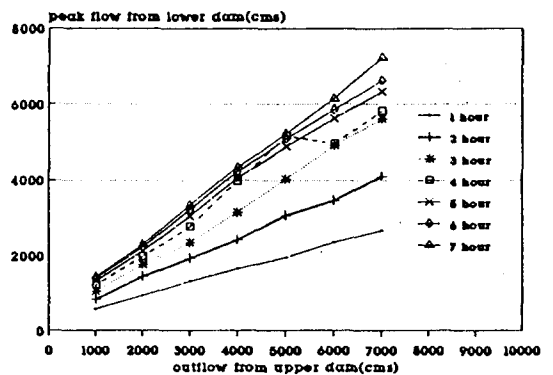


그림 7 첨두홍수량-상류댐방수량-방류계속시간  
(화천댐-춘천댐)

표 2  $Q_0-t_0-t_p-Q_p$  관계자료(화천-춘천)

$t_0$	1		2		3		4		5		6		7	
	$t_p$	$Q_p$	$t_p$	$Q_p$	$t_p$	$Q_p$	$t_p$	$Q_p$	$t_p$	$Q_p$	$t_p$	$Q_p$	$t_p$	$Q_p$
1000	3.5	575	4.2	828	4.9	1050	5.8	1222	6.7	1331	7.6	1404	8.6	1453
2000	3.4	942	3.8	1440	4.7	1768	5.6	1978	6.5	2123	7.4	2231	8.4	2310
3000	3.0	1330	3.8	1939	4.5	2351	5.4	2761	6.3	3036	7.2	3215	8.1	3332
4000	3.0	1664	3.6	2428	4.4	3157	5.2	3698	6.1	4035	7.0	4230	8.0	4344
5000	2.8	1975	3.5	3066	4.3	4026	5.2	3698	6.0	4902	7.0	5105	7.9	5240
6000	2.6	2375	3.4	3456	4.2	4932	5.1	4970	6.0	5621	6.9	5845	7.8	6142
7000	2.4	2678	3.3	4101	4.1	5623	5.0	5814	5.9	6323	6.8	6613	7.7	7227

표 2 의 부정류 계산으로 얻어진 결과중  $t_p-t_0-Q_0$  관계를 분석하기 위하여 이들 관계를 그림으로 표시한 것이 그림 6 이다.

그림 6 에서 볼 수있는 바와같이 홍수도달시간은 방류계속시간이 일정할 경우 상류댐 방류량이 증가할수록 짧아지며, 상류댐의 방류량이 일정할 때에는 방류계속시간이 길어질수록 홍수도달시간도 길어짐을 알 수있다. 또한, 이들 관계는 그림 6 에서 볼 수있는 바와같이  $t_p-Q_0$  의 관계가 半對數方眼紙상에서  $t_0$ 를 제 3의 변수로하는 直線形 관계임을 알 수있다. 따라서, 다음과 같은 식에 맞추어 多重線形回歸分析을 실시하였으며 그 결과는 표 3 에 수록되어있다.

$$t_p = a + b t_0 + c \ln Q_0 \tag{1}$$

여기서 a, b, c 는 回歸常數이다.

표 3 댐 區間別  $t_p-t_0-Q_0$  關係의 回歸常數

회귀상수 댐 구간	a	b	c	다중 상관계수
화천댐-춘천댐	5.611	0.860	-0.449	0.996
춘천댐-의암댐	3.584	0.938	-0.310	0.981
소양강댐-의암댐	4.370	0.887	-0.405	0.995
의암댐-청평댐	7.633	0.756	-0.586	0.988
청평댐-팔당댐	-0.024	0.976	0.072	0.994
충주댐-여주수위표	12.327	0.626	-0.977	0.962
충주댐-팔당댐	24.387	0.295	-1.729	0.955

표 3 의 댐 區間別 多重回歸分析결과를 보면 모든 구간의 경우 相關係數가 상당히 높은 것으로 나타났으므로 식 1 의 관계에 의한 홍수도달시간의 추정은 신뢰도가 높을 것으로 보인다.

따라서, 홍수시 댐 管理者의 홍수도달시간 推定을 돕기위해 식 1 의 회귀방정식과 표 3 의 회귀 상수를 사용하여 화천댐-춘천댐 구간의 홍수도달시간 조건표를 작성 할수 있을 것이다.

#### 4.1 댐 下流 主要 地點의 水位變動 分析

상류댐 방류시 댐 하류에 위치한 임의 지점에서의 수위에 영향을 미치는 因子는 댐 구간의 홍수 도달시간에 영향을 미치는 인자와 동일하다고 말할 수 있다. 또한, 지점별 수위는 홍수파의 진행에 따라 시간에따라 변동하므로 홍수관리측면에서 중요한 의미를 가지는 첨두홍수위만이 관심사이기도 하다.

따라서, 본 연구에서는 앞의 홍수도달시간 계산에서 전제한 조건에 대하여 부정류계산을 시행한 결과를 사용하여 主要 地點(혹은 댐 地點)에서의 첨두홍수위의 크기가 댐 방류량과 방류시간의 길 이에따라 어떻게 변화하는 지를 검토하였다.

##### 4.1.1 댐 하류 主要地點의 선정

본 연구의 7개 대상 댐 구간에 대하여 구간별 하류 주요지점으로는 표 4 과 같이 구간별 하류댐 의 水位標지점과 特定 河川 水位標 지점(여주 수위표)을 선정하였다.

표 4 댐 하류 주요지점의 선정

댐 구간	주요 지점
화천댐-춘천댐	춘천댐 수위표
춘천댐-의암댐	의암댐 수위표
소양강댐-의암댐	의암댐 수위표
의암댐-청평댐	청평댐 수위표
충주댐-여주수위표	여주 수위표

이중 댐 수위표는 각 댐의 取水塔 부근에 설치되어 저수지 수위(저수위)의 변동을 측정하고 있 으며 여주수위표는 수위표지점에서의 하천수위를 측정하고있다.

청평댐-팔당댐 구간과 충주댐-팔당댐 구간의 경우는 전술한 바와같이 홍수시 팔당댐의 수문을 조 작하여 상류로 부터의 홍수유입량에따라 일정범위의 저수위를 유지할 수 있도록 하고 있어서 본 연 구에서는 팔당저수지에서 저수위를 EL. 25.5m로 고정시켰으므로 수위변동분석을 위한 대상지점에 서는 제외시켰다.

##### 4.1.2 主要 地點別 尖頭洪水位의 變動

표 4 에 선정된 댐 및 하천 수위표 지점에 있어서의 尖頭洪水水位는 尖頭洪水量에 해당하는 수위이므로 부정류계산에 의해 상류댐의 방류량별로 계산한 하류댐의 댐 수위표 지점 혹은 하천 수위표 지점에서의 홍수수문곡선상의 尖頭放流量(혹은 洪水量)을 결정하여 이를 Rating-curve에 의해 저수위(혹은 홍수위)로 바꾸어 주면 된다.

전술한 바와같이 지점별 尖頭洪水水位는 댐 구간 홍수도달시간의 계산에서처럼 여러가지 因子에 영향을 받는다, 댐 하도구간으로의 측방유입을 고려하지 않고, 초기하도유량을 500m<sup>3</sup>/sec 로 잡고, 하류댐 수문의 완전개방조건을 상정하면 상류댐으로부터의 방류량과 방류시간 長徑에 따라 변화할 것임을 짐작할 수 있다. 따라서, 계산한 댐구간별 방류량과 방류시간에 따른 하류댐의 홍수방류수문곡선으로 부터 첨두유량을 결정하여 화천댐-춘천댐구간의 댐 방류량(Q<sub>0</sub>)-방류시간(t<sub>0</sub>)-하류지점 첨두홍수량(Q<sub>p</sub>) 관계를 그림 7 에 표시하였다.

그림 7 에서 볼 수 있는 바와같이 하류 지점에서의 첨두홍수량(Q<sub>p</sub>)은 상류댐의 방류계속시간(t<sub>0</sub>)가 일정할 때 상류댐으로부터의 放流量(Q<sub>0</sub>)의 크기에 비례하여 커지며 방류계속시간이 커짐에 따라서도 증가하는 성향을 보이고 있다. 따라서, 다음과 같은 다중선형회귀식에 맞추어 부정류 계산으로부터 획득한 자료를 회귀분석 하였으며 그 결과는 표 5 에 수록하였다.

$$Q_p = d + e t_0 + f Q_0 \tag{2}$$

여기서, d, e, f 는 回歸常數이다.

표 5 댐 구간별 Q<sub>p</sub>-t<sub>0</sub>-Q<sub>0</sub> 관계의 回歸常數

회귀상수 댐 구간	d	e	f	다중 상관계수
화천댐-춘천댐	-1305.878	0.736	422.250	0.924
춘천댐-의암댐	-210.163	0.939	189.806	0.981
소양강댐-의암댐	99.710	0.963	106.687	0.986
의암댐-청평댐	-2120.947	0.826	595.587	0.926
청평댐-팔당댐	-157.512	0.969	194.908	0.977
충주댐-여주수위표	-1455.751	0.854	450.403	0.919
충주댐-팔당댐	-2300.251	0.625	674.123	0.907

표 5 의 댐 구간별 다중회귀분석 결과를 보면 모든 구간의 경우 상관계수가 대단히 높은 편이므로 식 2 의 관계에 의한 하류지점의 첨두홍수량 추정은 신뢰도가 높을 것으로 생각된다. 따라서, 식 2 의 회귀방정식과 표 5 의 회귀상수를 사용하여 화천댐-춘천댐구간의 첨두홍수량을 계산하고 각 지점에서의 流量-水位 관계곡선에 의해 尖頭貯水位로 환산이 가능하므로 이를 환산하



여 하류 주요지점별 尖頭洪水位( $H_p$ )가 상류댐의 방류량( $Q_0$ )과 방류계속시간( $t_0$ )에 따라 여하히 변동할 것인가를 예측할 수 있도록 조건표를 작성할수 있을 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 홍수시 댐 방류로 인한 하류수위와 도달시간의 추정을 위해 한강 유역의 댐 구간에서 수리학적 홍수추적을 실시하여 계산결과에 의해 다중회기분석을 통해, 장래에 있을 상류댐 방류에 의한 하류댐에서의 수위와 홍수도달시간을 추정할 수 있는 회기방정식을 유도 하였다.

- 1) 上流댐 放流에 의한 하류댐에서의 流入量이나 洪水到達時間은 河道내 초기방류량에 의해 커다란 영향이 없다고 볼수 있었다.
- 2) 洪水시 하류댐 여수로의 水門개도 정도에 따라 홍수 도달시간은 큰 영향을 받는다. 즉, 수문개도가 증가할수록 댐 하도구간의 저류효과가 감소하여 홍수도달시간은 짧아지고 첨두홍수량은 커진다고 할수있다.
- 3) 홍수도달시간은 방류계속시간이 일정한 경우 상류댐 방류량이 증가할수록 짧아지고, 첨두홍수량의 크기는 커진다. 또 상류댐 방류량이 일정한 경우에는 방류계속시간이 길어질수록 홍수도달시간도 길어짐을 알수 있었다.
- 4) 洪水到達時間과 방류량의 관계가 반대수지상에서 방류계속시간을 제 3의 변수로 하는 직선형관계가 됨을 알수 있었고 이를 다중회기식으로 나타내어 본 결과 상관계수가 매우 높음을 알수 있었고 이에 따라 洪水到達時間 조건표를 작성하였다. 이러한 조건표는 洪水到達時間을 추정할수 있어 댐 조작측면에서 도움이 될수 있을 것이다.
- 5) 댐방류시 하류지점에서의 첨두홍수량을 상류댐의 방류시간과 방류량에 따라 도시해보면 선형관계가 있음을 확인할수 있었으며 다중선형회기분석으로 첨두홍수량을 추정할 수 있었다. 이를 유량-수위 관계곡선에 의해 하류 주요지점별 첨두홍수위로 나타내고 이에 따라 상류댐의 방류량과 방류계속시간에 따라 변동을 예측할수 있었다.\*

## 6. 감사의 글

본 연구는 건설부 한강홍수통제소의 1991년도 한강수계 유출 프로그램 개선방안 연구사업의 일부로 수행되었음을 밝히며 연구에 많은 지원을 아끼지 않은 한국건설기술연구원 수자원연구실의 정

상만 박사님과 이동률 연구원께 심심한 사의를 포함합니다.

## 7. 參 考 文 獻

1. Abramowitz, M., and Stegun, I., "Handbook of Mathematical Functions", Dover, New York, 1972
2. Amein, M., and Chu, H. L., "Implicit Numerical Modeling of Unsteady Flows", J. Hydr. Div., ASCE, 101(HY6), June, 1975
3. Amein, M., and Fang, C., "Implicit Flood Routing in Natural Channels" J. Hydr. Div., ASCE, 96(HY12), December, 1970
4. Chow, V., T., "Applied Hydrology", McGraw-Hill Book Co., New York N. Y., 1964, PP. 272-349
5. Fread, D., L., "Dam Break Model", National Weather Service, June, 1988
6. Fread, D. L., and Smith, G. F., "Calibration Technique for 1-D Unsteady Flow Models", J. Hydr. Div., ASCE, 104(HY7), July, 1978
7. French, R., H., "Open Channel Hydraulics" McGraw-Hill Book Co., New York, N. Y., PP. 549-582
8. Ponce, V. M., and Indlekofer, H., "Convergence of Four-Point Implicit Water Wave Models", J. Hydr. Div., ASCE, 104(HY7), July, 1978
9. Preissmann, A., "Propagation of Translatory Waves in Channel and Rivers", Grenoble, France, 1961 PP. 433-442
10. Viessman, W, Jr., and Knapp, J., W., "Introduction to Hydrology", IEP, New York, 1972, PP. 249-268
11. 建設部, "漢江河川整備基本計劃", 1977, 1988
13. 建設部, "北漢江河川調查報告書", 1990
14. 建設部, "北漢江, 昭陽江河川整備基本計劃", 1990
15. 建設部, "漢江河川整備基本計劃", 1977