

# Earth Dam의 파괴로 인한 유출수문곡선의 해석

An Analysis of Outflow Hydrograph Resulting from an Earth Dam-Break

韓 健 淵\*

Han, Kun Yeun

李 鍾 泰\*\*

Lee, Jong Tae

李 元 煥\*\*\*

Lee, Won Hwan

## Abstract

The mathematical analysis of the outflow hydrograph resulting from earth dam-break was studied. DBFW(Dam Break Flood Wave) model based on the breach mechanism and reservoir storage equation was developed and was applied to the Teton and Buffalo-Creek dam. The modeling results showed that the shape of outflow hydrograph, peak discharge and failure duration time had a good agreement with the data analyzed by NWS.

The breach mechanisms which exert influence on the outflow hydrograph were consisted of geomorphological characteristics of the reservoir, breach mode, breach width and failure duration time. The earth dams in Korea were classified into four types by the reservoir geomorphology, and water surface elevation-failure duration time-peak discharge relationships were also presented.

The methodological procedure made in this paper will provide a basic contribution to dam-break study in river system.

## 要 旨

本 研究에서는 earth dam 파괴로 인한 流出水文曲線의 解析을 實施하였다. Earth dam의 파괴에 대하여 이제까지 研究, 調査된 파괴양상 및 貯溜方程式等を 바탕으로 DBFW(Dam Break Flood Wave) 模型을 開發하였고 開發된 模型을 Teton 과 Buffalo-Creek 댐에 適用하여 流出水文曲線을 解析하였는데 그 結果는 流出水文曲線의 形狀이나 尖頭流量 및 尖頭發生時間 등에 대하여 NWS의 調査結果와 매우 작은 偏差로 一致하고 있어 本 模型의 適用性을 立證하였다.

파괴양상이 流出水文曲線에 미치는 영향은 貯水池의 地形學의 特性, 파괴부의 形態, 파괴폭 및 파괴지속시간등이 큰 것으로 나타났으며, 국내 earth dam을 地形學의 特性에 의하여 4 가지 type 으로 區分하고 각각에 대한 水位-水表面積 關係式을 導出した 후 임의의 댐 높이와 파괴지속시간에 대한 尖頭流出量 및 流出水文曲線을 구할 수 있는 圖表를 提示하였다.

\* 正會員·慶北大學校 工科大學 專任講師, 土木工學科

\*\* 正會員·京畿大學校 工科大學 助教授, 土木工學科

\*\*\* 正會員·延世大學校 工科大學 教授, 土木工學科

## 1. 序 論

댐이나 堤防等 大規模의 水體를 貯溜하고 있는 水工構造物들은 設計에 있어서는 充分한 安全率이 考慮되고 施工에 있어서도 매우 주의깊게 實施되고 있는데도 불구하고 다음과 같은 몇가지 原因에 의하여 파괴가 發生되고 있다.

댐파괴는 주로 集中豪雨로부터 야기되는 大規模流出이 貯水池로 流入됨으로 인하여 餘水路의 洪水疎通能力이 適節하지 못한 경우 溢을 越流하는 overtopping 이나 溢 堤體內에서 發生하는 seepage, piping, sliding 및 地震등에 의한 liquefaction 이 그 主要原因이다.

大容량의 水體를 貯溜하고 있는 水工構造物의 예기하지 못한 파괴로부터 야기되는 피해는 豫想할 수 없을 정도로 큰 것이기 때문에 이미 많은 국가에서는 溢 下流部의 人命과 財産 및 各種 施設物들을 保護하기 위하여 溢 파괴로 發生하는 洪水波解析 및 下流部의 影響을 나타낸 洪水氾濫圖등의 作成을 法的으로 義務化하고 있다.<sup>(1)</sup>

Middlebrook의 調査에 의하면<sup>(2)</sup> 1950년 以前에 美國에서는 220개의 earth dam 이 파괴되었다고 報告되었고, Johnson과 Illes는<sup>(3)</sup> 1946~1965년간 全世界의 溢 파괴된 300餘個의 溢 에 대한 調査分析을 實施하였고, 美陸軍工兵團 資料<sup>(4)</sup>에 의하면 美國내의 50,000여개의 溢 중 40%가 파괴시 溢 하류부의 人命과 財産에 커다란 危險이 있으며 이들 溢 중 大部分은 earth dam 으로 調査되었다.

우리나라에서는 1961년 孝基里<sup>(5)</sup> 및 1980년 報恩邑<sup>(6)</sup> 등을 비롯한 여러 지역에서 貯水池堤防 및 小溜池등이 파괴, 유실된 사실이 보고된 바 있는데, 우리나라 全域에도 많은 大·小規模 溢 및 堤防이 建設, 運用되고 있는 바, 예기치 못한 이들 構造物의 파괴로부터 發生되는 被害를 예측하고 對策을 講究하기 위한 한 方面으로서의 水工學的 研究의 必要性은 매우 切實하다고 判斷된다.

### 1.1 研究目的 및 範圍

溢 파괴로부터 야기되는 洪水(dam break

flood)는 다른 어떤 降雨-流出에 의한 洪水와 바할 수 없을 만큼 그 規模가 크고, 下流部에 미치는 被害는 想像할 수 없을 만큼 막대하다. 溢 파괴로 인한 流出水文曲線의 形態 및 尖頭流出量 및 發生時間, 파괴持續時間을 豫測하는 것은 溢 의 安全에 관한 計劃樹立 및 維持運用에 매우 重要하며 實時間 洪水豫報(real time flood forecasting)를 통하여 下流部 被害를 最大限으로 輕減하는데 매우 所重한 資料가 된다.

本 研究의 範圍는 earth dam 파괴의 一般的 特性 및 파괴부의 樣相, 파괴形態, 파괴持續時間 등에 대한 이제까지의 調査結果를 分析하였고, 貯水池內로의 流入量과 貯水池의 貯溜方程式 등을 利用하여 時間에 따른 流出量을 計算하고 또한 貯水池 水位가 流出量에 미치는 影響(submergence effect)을 考慮하여 豫測模型 DB-FW(Dam Break Flood Wave)를 開發하였다.

Teton 및 Buffalo-Creek 溢 등의 경우를 본 DBFW에 適用하여 流出水文曲線을 誘導하였고 그 結果를 실제 파괴시의 水位, 流量資料 및 다른 研究結果와 比較檢討하여 本 模型의 適用性을 確認하였다. 또한 溢 파괴 樣相이 流出水文曲線에 미치는 影響을 國內 earth dam 資料를 利用하여 다각적인 면에서 比較檢討 하였다.

### 1.2 研究動向

溢 파괴에 관한 연구의 효시는 Dressler(1952)<sup>(7)</sup>, Whitham(1955)<sup>(8)</sup>, Su(1970)<sup>(9)</sup>, 등에 의하여 급격한 파괴로부터 發生하는 positive wave와 negative wave에 관한 연구가 있고 美陸軍工兵團의 WES(1960~61)<sup>(10)</sup>에서는 水理模型을 利用한 溢 파괴에 관한 實驗을 실시하였다. Earth dam의 점차적 파괴에 대하여 Cristofano<sup>(11)</sup>(1965)는 최초로 溢 파괴부의 發達過程에 대하여 研究하였고 Fread 등<sup>(12)</sup>(1973)은 earth-dam의 파괴를 저지하기 위한 erosion retarding layer의 설치에 관하여 研究하였으며 Price 등<sup>(13)</sup>(1974)은 WES의 實驗結果는 大規模 重力댐에 適合하고, earth dam의 파괴에 대하여는 適用이 不可能하다고 報告하였고 Brown과 Rodger<sup>(14)</sup>(1977)는 sediment routing을 包含한 earth dam 파괴모형을 開發하였다.

最近에 들어 earth dam 파괴에 대한 研究는 Fread<sup>(15)</sup>(1977)에 의하여 파괴양상, 파괴속도등에 관한 연구가 이루어졌으며 Ponce<sup>(16)</sup>(1981)는 Fread의 理論에 sediment routing, breach morphology 概念을 導入하였고, MacDonald 등<sup>(17)</sup>(1984)은 earth dam 파괴의 實測資料를 中心으로 하여 調査, 研究하였다.

## 2. Earth Dam의 파괴

### 2.1 댐파괴의 基本理論

댐 파괴 舉動은 크게 두가지로 區分하여 說明할 수 있다. 첫째는 댐구조물에 가해지는 過度한 應力에 의하여 構造物의 一部 또는 全體가 갑자기 제거되는 순간적인 파괴(Instantaneous Failure)와 두번째는 댐 堤體를 構成하고 있는 土粒子的 침식에 의하여 發生하는 점차적인 파괴(Gradual Failure)이다.

순간적인 파괴는 콘크리트 아치댐이나 重力댐 등에서 볼 수 있는 현상으로서 댐자체의 不適節한 設計나 水體의 越流, 地震, 댐 接合部의 不安全 등에 의한 過度한 힘이 댐 構造物에 커다란 應力을 作用시켜 構造物을 轉到시키거나 밀어냄으로써 發生되는데 이 경우는 댐 전체가 파괴부가 되며 數學的 解析에 있어서도 점차적인 파괴에 비하여 훨씬 單純하다. 이러한 파괴형태의 예는 St. Francis 댐, Lake Gleno 댐, Austin 댐 등이 있다.

그러나 earth dam의 경우에는 점차적인 파괴가 發生되는데 水體의 흐름이 댐을 越流하는 overtopping이나 댐 堤體나 基礎部 또는 接合部를 통한 seepage, piping에 의한 경우가 大部分으로서 파괴부는 堤體를 構成하는 土粒子가 浸蝕되어 감에 따라 점차적으로 發達되어 커지게 된다. 파괴부의 크기와 形狀, 파괴시간 등은 土粒子的 浸蝕성과 水體의 流動性에 기인하게 되는데 파괴시간은 대략 數分에서 3,4時間 정도이고 댐의 일부분이 파괴부로 形成된다.

이들 중 overtopping은 댐의 높이와 貯水池內의 水位差가 大略 0.5 m 以內가 되면 댐 頂部의 가장 약한 下流端이 침식하여 파괴가 시작되고, 물 粒子的 流動이 이 약한 부분을 계속 깎아내

고 파괴부가 바닥에 이룰때 까지 계속되다가 浸蝕性이 작은 自然地盤에 이르면 中止된다. piping에 의한 파괴는 물이 堤體를 통하여 누수되고, 空洞을 形成하여 댐 下流端을 침식하면서 發生되는데 이 경우 누수되는 流速이 크게 되면 堤體內의 土粒子를 流失시키고 이것이 加速化됨에 따라 overtopping의 경우와 類似한 形態로 파괴가 進行된다. 점차적인 파괴의 경우에는 그 파괴 특성이 매우 多樣하여 이를 模型化하기가 용이하지가 않고 이러한 파괴의 예는 모든 earth dam의 파괴가 해당되고 그 예도 많으나 파괴시 파괴부의 實測資料를 얻기가 매우 어렵다.

실제로 earth dam의 파괴원인에 대하여 Johnson & Illes의 調査<sup>(3)</sup>에 의하면 適節하지 못한 餘水路에 의하여 發生하는 overtopping이 전체 파괴의 35%이고, piping, seepage가 25%이며, Missouri 주 地質局<sup>(12)</sup>에 의하면 州內에서 調査된 39개 댐 중 24개가 overtopping으로 인한 파괴의 위험이 있는 것으로 報告된바 있고 ASCE<sup>(18)</sup>의 資料에 의하여도 overtopping 및 piping, seepage 등에 의한 파괴가 거의 大部分을 차지하고 있다.

일반적으로 댐파괴의 問題를 다루는데 있어서 는 水體의 境界條件들이 放出되는 洪水波와 關聯되어 數值的 또는 函數學으로 表現될 수 있어야 한다. 댐 파괴의 양상이 時間的 및 幾何學의 으로 記述되어야 하고 파괴부의 形狀, 貯水池內로의 流入量, 貯水池의 貯溜方程式, 餘水路나 터어빈을 통한 파괴부의 流量, 댐 바로 下流部의 水位에 따른 submergence effect 등에 의한 影響要素들을 複合的으로 考慮하여 流出水文曲線이 誘導되어야 한다.

### 2.2 파괴부의 樣相

파괴양상이 流出量에 미치는 特性들은 파괴부의 形態, 크기, 파괴소요시간등이 있다. 파괴부의 形態는 不確實하지만 問題의 單純化를 위하여 一般的으로 比較的 구체적인 形態를 假定하여 解析하고 있는데, 삼각형, 직사각형, 사다리꼴형, 반원형, 반타원형, 포물선형이 있겠으나 그림 1과 같은 3가지 基本形態가 實際觀測된 形狀과 類似한 것으로 調査된바 있다<sup>(15)</sup>. 또한

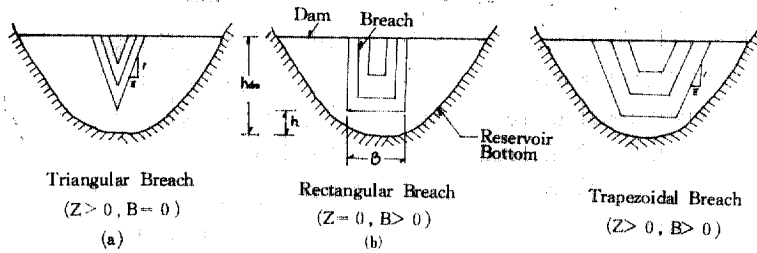


그림 1. Dam Breach Characteristics

이것들 중에서는 그림 1-(c)의 사다리꼴형이 側壁面傾斜  $Z(0 \leq Z \leq 2)$ , 파괴부의 폭  $B$  등을變化시키기에 따라 가장 一般化된 形態를 表現할 수 있다.

Ponce, Fread<sup>(12,15,16)</sup> 등에 의하면 파괴지속시간  $T$  동안 임의시간  $t$ 에서의 파괴부의 폭  $B_t$ 와 파괴부의 底面높이  $h_b$ 는 時間에 따라 線型的으로 각각 增加 및 減少하는 것으로 가정하였고, 最終의 파괴부의 形狀은  $T, Z, B_t, h_b$  등에 의하여 決定되며 임의시간  $t$ 에서의  $B_t, h_b$ 는 각각 다음식과 같이 쓸 수 있다.

for  $0 < t < T$

$$\left. \begin{aligned} B_t &= B \times \frac{t}{T} \\ h_b &= h_{bm} + (h_{dm} - h_{bm}) \left( \frac{T-t}{T} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

for  $t \geq T$

$$B_t = B, \quad h_b = h_{bm} \quad (2)$$

여기서,

- $h_b$ : 時間  $t$ 에서의 파괴부 저면의 높이 (m)
- $h_{bm}$ : 파괴부의 最終높이 (m)
- $h_{dm}$ : 댐 頂部의 높이 (m)
- $B_t$ : 시간  $t$ 에서의 파괴부의 폭 (m)
- $B$ : 파괴부의 最終 폭 (m)

파괴양상의 또 다른 重要한 特性 중의 하나는 파괴부의 平均幅과 파괴시간, 파괴속도 등이다. Singh가 調査한 結果<sup>(18)</sup>에 의하면 파괴 上端의 폭  $B$ 와 댐높이  $h_{dm}$ 과의 關係는  $2h_{dm} \leq B \leq 5h_{dm}$ 의 범위에 있다고 하였고, MacDonald<sup>(17)</sup>가 調査한 댐파괴에 관한 資料를 plot한 結果  $B$ 의 값은  $h_{dm} \leq B \leq 5h_{dm}$ 의 범위로 밝혀졌으며 Fread<sup>(15)</sup>의 파괴부 平均幅  $\bar{B}$ 에 대한 研究結果는  $h_{dm} \leq \bar{B} \leq 3h_{dm}$ 으로 나타나 있어 이들 값을 比較하여

볼 때 Singh와 MacDonald의 調査値가 파괴부의 上端幅을 감안하면 Fread의 研究結果가 타당한 것으로 判斷되었다. 파괴시간 역시 Singh, MacDonald, Fread 등의 調査에 의하여 比較的 堅固하게 築造된 earth dam의 경우  $0.5 \leq T \leq 3.0$  시간 범위로 나타났다. 파괴속도는 댐 堤體를 構成하고 있는 土粒子의 浸蝕性(erosibility)에 크게 左右되는데 本 研究에서는 파괴가 進行되는 동안 주어진 파괴시간내에서 浸蝕性은 一定하다고 假定하였던 바 흙의 浸蝕性을 考慮한 보다 合理的인 파괴속도의 決定은 앞으로 계속 研究되어야 할 課題이다. 댐파괴부의 特性을 earth dam, concrete gravity dam, concrete arch dam 등으로 區分하여 이제까지 調査된 結果들을 整理하면 표 1과 같다.

표 1. Dam Breach Characteristics

Type of Dam	Avg. Breach Width ( $\bar{B}$ )	Failure Time (hrs) ( $T$ )
Earth(well constructed)	$h_{dm} \leq \bar{B} \leq 3h_{dm}$	$0.5 \leq T \leq 3.0$
Earth	$h_{dm} \leq \bar{B} \leq 3h_{dm}$	$0.1 \leq T \leq 0.5$
Concrete(Gravity)	$\bar{B} \geq 0.5W$	$T \leq 0.2$
Concrete(Arch)	$\bar{B} \geq 0.8W$	$T \leq 0.1$

(주)  $W$ : 댐 堤體의 폭,  $h_{dm}$ : 댐의 높이를 나타내고 있음.

### 3. 流出水文曲線

#### 3.1 貯溜方程式

댐파괴로 인한 流出水文曲線을 誘導하기 위하여서는 貯水池內로의 流入量과 流出量에 따른 貯水容量의 變化가 考慮된 貯溜方程式이 使用되어야 한다. 任意의 時間  $t$ 에서의 總流出量  $Q$ 는

파괴부를 통한 流出量  $Q_b$  와 비파괴부를 통한 流出量  $Q_r$  의 합으로 表示되며  $Q_b$  는 overtopping 에 의한 경우와 piping 에 의한 경우로 나누어 생각할 수 있다.

overtopping 에 의한 경우에  $Q_b$  는貯水池內로의 水頭와 파괴부 형상의 함수로서 廣頂堰어 (broad crested weir) 의 식으로 計算될 수 있다.

$$Q_b = C_1 \beta b (h - h_b)^{1.5} + C_2 \beta (h - h_b)^{2.5} \quad (3)$$

여기서,

$C_1$ ; 廣頂矩形堰어의 流量係數

$C_2$ ; 廣頂三角形堰어의 流量係數

$h$ ; 임의의 時間에서의 貯水池의 水位

$h_b$ ; 임의의 時間에서의 파괴부의 높이

또한 piping 에 의한 파괴의 경우에는 위의 (3) 식을 오리피스 流量公式로 變形하여 구할 수 있고 비파괴부를 통한 流量(예를 들어 餘水路를 통한 流量)은 既存의 貯水池 水位에 따른 放流量 資料를 利用하거나 다음식에 의하여 計算할 수 있다.

$$Q_r = C_3 (h - h_r)^{1.5} + C_4 a (h - h_r)^{0.5} + C_5 (h - h_{dm})^{1.5} + Q_i \quad (4)$$

여기서,

$C_3$ ; 餘水路를 통한 流量係數

$C_4$ ; 水門의 流量係數

$a$ ; 水門의 流出斷面積

$h_r$ ; 水門의 높이

$C_5$ ; 堰頂部에서의 流出量 係數

$Q_i$ ; 其他流出量

위의 식들로 부터 質量保存法則에 기초한 貯溜方程式은 다음과 같다.

$$\frac{dS}{dt} = Q_i(t) - Q_b(h, t) - Q_r(h, t) \quad (5)$$

여기서,

$\frac{dS}{dt}$ ; 時間에 따른 貯水容量의 變化率

$Q_i(t)$ ; 貯水池內로의 流入量

$Q(h, t)$ ; 貯水池로 부터의 流出量

$h$ ; 時間  $t$  에서의 貯水池의 水位

### 3.2 Submergence Effect

파괴부를 통한 流出이 水中에서 이루어지면 流出量을 補正할 必要가 있다.

일반적으로 submerged flow 는 흐름의 渦流領域이 發生되고 跳水現象으로 인하여 不安定한 狀

態를 일으키게 되며 이 경우 作用하는 變數로서는 파괴부 上下流의 水位, 下流部 水路의 흐름 狀態, 파괴부의 固定된 境界面에서의 壓力分布, 파괴부의 형태와 크기, 上下流部の 渦流領域 등에 의해 決定되는데 submergence factor  $\beta$  는 다음식으로 表示된다.

$$\beta = \frac{Q}{Q'} \leq 1.0 \quad (6)$$

여기서,

$Q$ ; submerged 狀態에서의 流出量

$Q'$ ; free outflow 狀態에서의 流出量

實用的인 面에서 submergence factor  $\beta$  를 구하는 方法은 크게 두가지로 구분하여 생각할 수 있는데 첫째는 이미 水理學的 實驗으로 부터 얻은 結果를 토대로 作成된 圖表를 利用하는 것이고, 둘째는 廣頂堰어의 完全越流, 不完全越流의 理論을 利用하여 다음과 같은 計算式 (7)에 의하여 submergence factor 를 구하는 것이다.

$$\beta = 1.0 \quad \text{for } \frac{h_d - h_b}{h - h_b} \leq 0.67$$

$$\beta = 1.0 - C \left[ \frac{(h_d - h_b)}{(h - h_b)} - 0.67 \right]^3 \quad \text{for } \frac{h_d - h_b}{h - h_b} \geq 0.67 \quad (7)$$

여기서,

$\beta$ ; Submergence factor

$C$ ; 經驗的 常數

$h_d$ ; 堰 下流部の 水位

$h_b$ ; 파괴부의 높이

### 3.3 流出水文曲線의 誘導

파괴에 따른 貯溜方程式이 誘導되고 下流水深과 파괴부 수위와의 關係에 의한 submergence factor 가 決定되면 時間에 따른 貯水池로 부터의 流出水文曲線이 誘導될 수 있다. 식 (5)을 有限差分의 形態로 나타내면 식 (8)과 같이 표시되는데 여기서  $A_s$  는 수위  $h$  에서의 貯水池의 水表面積, (\*) 표시는 時間間隔이 初期狀態를 나타낸다.

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{Q_i^* + Q_i}{2} + \frac{Q_r^* + Q_r}{2} + \frac{Q_b^* + Q_b}{2} = 0 \quad (8)$$

$$\text{여기서, } \Delta S = \left( \frac{A_s^* + A_s}{2} \right) (h^* - h) \quad (9)$$

(3), (4), (9)식을 (8)식에 代入하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta t} (A_s^* + A_s) (h^* - h) + C_1 \beta b (h - h_s)^{1.5} \\ & + C_2 \beta (h - h_s)^{2.5} + C_3 (h - h_s)^{1.5} \\ & + C_4 \cdot a (h - h_r)^{0.5} + C_5 (h - h_{dm})^{1.5} + Q_i \\ & + Q_s^* + Q_r^* - Q_i^* - Q_i = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

이 식에서  $A_s$ 는 수위  $h$ 의 函數이고,  $h$  以外의 다른 모든 값들은 既知이기 때문에 식 (10)은 未知의  $h$ 에 대하여 Newton-Raphson iteration을 利用하여 풀 수 있다. 普通 5~6回 정도의 反復으로 求解된  $h$  값으로 식 (3), (4)에 의하여 任意의 時間  $t$ 에서의 全體流出量  $Q$ 를 구하면 流出水文曲線이 誘導된다. 이 경우에 있어서 時間間隔  $\Delta t$ 는 數值積分上에서 安全性과 正確度를 考慮한 값을 취하였으며 計算過程을 電算化하여 DBFW(Dam Break Flood Wave) 模型을 만들었고 이를 實際狀況에 대하여 解析하고 實測資料와 比較檢討하여 그 適用性을 確認하였고 파괴형태, 파괴폭 및 파괴시간 등의 파괴양상이 流出水文曲線 및 尖頭流量과 尖頭發生時間等에 미치는 影響等을 檢討하였다.

#### 4. 適用 및 比較檢討

##### 4.1 Teton 및 Buffalo-Creek Flood

現在까지 댐파괴로 인한 피해가 報告된 바는 많으나 파괴시의 具體적인 實測資料를 國內에서는 구하기가 곤란하였다. 本 研究에서는 美國 地質調查局(USGS)에서 댐파괴에 관하여 調査된 數個資料中에서 Teton 댐(Idaho), 과 Buffalo-Creek 댐(W.V.)의 資料를 利用하여 댐파괴로 인한 流出水文曲線을 誘導하였고, 貯水池 및 下流部에서의 水位變動을 算定하여 調査된 實測資料와 比較檢討 하였다.

Teton 댐은 높이 약 91 m, 堤體의 길이 약 914 m, 貯水容量  $3.08 \times 10^8 \text{ m}^3$ 인 댐으로서 1976년 6월 5일 파괴되어 11명의 死亡者와 數千家口的 이재민을 냈고 下流部 Teton-Snake river valley에 약 4億弗의 被害額을 입혔다. Buffalo-Creek 댐은 West Virginia의 Buffalo-Creek의 支流인 Middle Fork에 있는 높이 14 m, 길이

128 m 댐으로서 1972년 2월 26일 파괴되었다. 이 당시  $6.17 \times 10^5 \text{ m}^3$ 의 水體가 짧은 시간에 放流되어 118명의 死亡者, 500가구의 이재민 냈고 被害額은 약 500만弗에 달했다.

이들 두개 댐에 대한 實測調査資料는 Teton 댐의 경우 Ray et. al.<sup>(20)</sup> (USGS, 1977)에 의하여 Buffalo-Creek 댐은 Davies et. al.<sup>(21)</sup> (USGS, 1972)에 의하여 調査된 댐 파괴부의 形成過程 및 形狀, 貯水容量의 變化, 下流部の 河川斷面과 Manning의 粗度係數, 尖頭流量이 通過할 때의

표 2. Breach Characteristics of the Dams

Breach Characteristics	Teton	Buffalo-Creek
Elevation of water when breached (m)	1612.0	470.9
Elevation of bottom breach (m)	1532.3	458.7
Side slope of breach (vert.; horizon.)	0	2.6
Base width of breach (m)	45.7	51.8
Breach duration time (hrs.)	1.25	0.083
Length of computation time (hrs.)	55.0	3.0
Inflow to the reservoir during breach (CMS)	368	21
Outflow through turbine (CMS)	368	28

표 3. Reservoir Geometry of the Dams

Teton		Buffalo-Creek	
Elevation (m)	Surface Area (ha)	Elevation (m)	Surface Area (ha)
1612.0	783.9	472.1	5.75
1593.7	467.8	467.9	4.17
1554.0	233.5	463.3	3.36
1535.8	87.4	458.7	1.62
0.	0.	0.	0.

표 4. Channel Geometry of Immediately Downstream

Teton		Buffalo-Creek	
Elevation (m)	Section Width (m)	Elevation (m)	Section Width (m)
1532.3	0.	458.7	3.1
1535.3	179.8	459.6	15.2
1539.6	249.9	461.8	61.0
1556.6	344.4	464.8	76.2
1562.1	365.8	—	—

水位, 流下時間等の 資料를 利用하였다.

표 2는 댐 파괴부의 實測資料, 표 3은 貯水池의 地形學的 資料, 표 4는 댐 바로 下流部の 河川斷面의 資料이며 河川에서의 Manning의  $n$  值도 實測資料인 Teton은 0.08, Buffalo-Creek는 0.035가 使用되었다. (20, 21)

本 研究에서의 DBFW 模型으로 부터 流出水 文曲線과 貯水池 및 댐 下流部の 水位變動을 각 項에 대하여 그림 2, 3, 4와 같이 얻었다. Teton 댐의 경우 尖頭流量은 46,830 CMS, 尖頭發生時間은 1.25 hr로 나타났고, 파괴지속시간은 約 6 hr 이었다.

Buffalo-Creek 댐의 경우 尖頭流量은 1,925 CMS, 尖頭時間은 0.078 hr로 나타났고 파괴지속시간은 0.25 hr 이었다. 이 값들은 NWS<sup>(15)</sup> (National Weather Service), HEC<sup>(22)</sup> (Hydrologic Engineering Center) 등에서 調査된 값과 比較的 良好하게 一致하고 있었다.

댐 파괴로 부터 야기되는 尖頭流量 및 水位가 下流로 傳播되어 감에 따라 減衰되는 現象과 下流部 各 斷面에서의 尖頭流量 通過時間 등은 洪水波 豫報 등에 매우 중요한 資料인데 Wetmore와 Fread는 尖頭流量을 推定하는 다음과 같은 近似式을 提案하였다. (15)

$$\left. \begin{aligned} Q_p &\cong 3.1W[C/(T+C/\sqrt{H})]^3 \\ C &= 23.4S_a/W \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

여기서,

$Q_p$ ; 尖頭流量(cfs)

$W$ ; 파괴부의 平均幅(ft)

$T$ ; 파괴소요시간

$H$ ; 파괴부의 높이(ft)

$S_a$ ; 댐 頂部에서의 貯水池의 表面積(acres)

尖頭流量值를 본 DBFW의 計算값, NWS의 研究結果值, Wetmore 등의 近似計算值와 比較하면 표 5와 같이 整理되는데 DBFW와 NWS의 結果는 그 偏差가 Teton과 Buffalo-Creek 댐

표 5. Comparison of Peak Discharge (CMS)

	DBFW	NWS	Wetmore et. al.
Teton Dam	46,380	46,623	46,218
Buffalo-Creek Dam	1,925	1,958	1,825

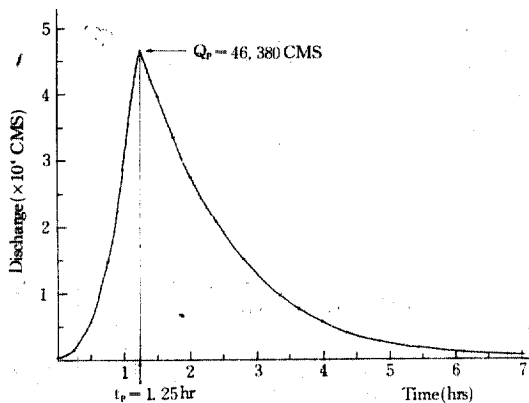


그림 2. Outflow Hydrograph from Teton Dam Failure

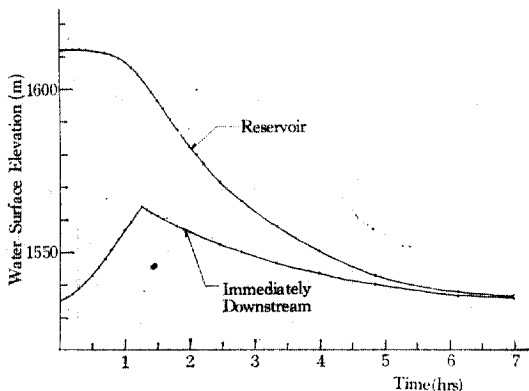


그림 3. Water Surface Elevation from Teton Dam Failure

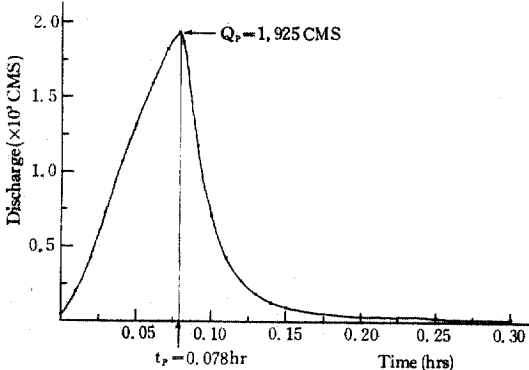


그림 4. Outflow Hydrograph from Buffalo-Creek Dam Failure

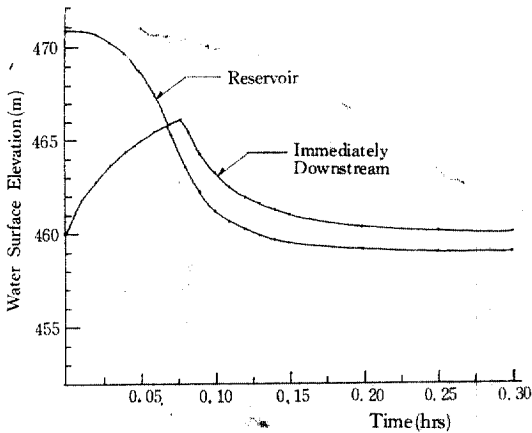


그림 5. Water Surface Elevation from Buffalo-Creek Dam Failure

에 대하여 그 偏差가 각각 0.5%, 2%로서 대단히 滿足 할만한 結果이며, 파괴부 形狀이 大略의 所以 考慮되고 流出入量도 전혀 고려되지 않은 Wetmore 등의 近似式도 그 偏差가 각각 1%, 5%로서 매우 良好하게 나타나 本 模型의 適用性은 매우 좋은 것으로 判斷되었다.

#### 4.2 파괴양상과 流出水文曲線

댐 파괴로 인한 流出水文曲線의 形狀과 尖頭流量의 크기 및 發生時間 등은 댐 下流部로 洪水波 追跡을 遂行하고 下流部의 洪水氾濫圖(inundation map) 등을 作成하는데 매우 重要한 資料가 된다.

따라서 본절에서는 파괴형태, 파괴폭, 파괴시간, 댐 높이 등이 流出水文曲線에 미치는 影響을 料明하기 위하여 國內 2,000 餘個의 earth dam에 대한 基礎資料를 通하여 假想的인 댐 파괴로부터 야기되는 流出水文曲線을 誘導하였는데 댐 높이, 댐 堤體의 길이, 滿水時의 貯水量 및 滿水面積 등의 資料가 使用되었다.

즉, 國內 댐에 대하여 代表的으로 適用할 수 있는 貯溜方程式을 誘導하기 위하여 2,141 個의 댐을 河川地形學的으로 比較的 同一한 特性을 갖는 몇가지의 形態로 區別하여 각 形態別로 代表的인 水位—水表面積 關係式을 導出하였다. 이때 形態區別을 위해 使用된 地形學的의 變數  $K$ 는 식 (12)으로 表示되며

$$K = \frac{A}{H} = \frac{\text{Surface Area (ha)}}{\text{Dam Height (m)}} \quad (12)$$

$K$ 의 값이 작을수록 댐은 河川上流部에 位置하며 狹谷인 地形에 작은 流域面積을 이루는 긴 貯水池를 갖는 댐을 意味하고,  $K$  값이 클수록 댐은 中下流部에 位置하며 큰 流域面積을 갖는 地形學的 特性을 나타내고 있는데 이것은 실제로 1/50,000 地形圖上에서 調査한 結果와 比較的 一致하고 있었다.  $K$  값에 의하여 貯水池의 Type을 4가지로 分類하고 각 Type 별로  $A = aH^b$ 의 形態로 相關式을 구한 結果가 표 6과 같이 整理되었고 이것들의 相關係數는 0.8~0.98에 이르는 높은 相關性을 나타내고 있다.

誘導된 4가지 Type의 댐들이 假想的으로 파괴되었을 때 流出水文曲線의 形態를 알아보기 위하여 댐 높이 20m에 대하여 표 1의 範圍를 考慮한 파괴부의 폭 40m, 파괴시간 1.75 hr에 대한 流出量을 計算하였다. 計算結果 가로축에 時間을, 세로축에 尖頭流量  $Q_{max}$ 에 대한 임의시간에서의 流量  $Q$ 의 비  $Q/Q_{max}$ 을 表示하여 圖示한 것이 그림 6이다.

표 6. Regression Result for Reservoir Storage Equation

Type	K Range	N	Regression Eq.	Correl. Coeff.
I	$0 < K < 0.5$	900	$A = 0.238H^{1.012}$	0.803
II	$0.5 \leq K < 1.0$	488	$A = 0.700H^{0.994}$	0.975
III	$1.0 \leq K < 5.0$	592	$A = 2.046H^{0.969}$	0.894
IV	$K \geq 5.0$	161	$A = 9.169H^{1.063}$	0.835

그림에서 볼 수 있듯이 尖頭流量의 發生時間은 type I의 0.66 hr에서 type IV의 4.4 hr에 達하고 있음을 알 수 있었고, 또한 尖頭流量은 type I이 162 CMS, type II가 422 CMS, type III가 1,030 CMS, type IV가 4,164 CMS로서 貯水池의 河川地形學的 特性에 따라 그 값도 큰 差異를 보이고 있었다.

또한 파괴부 형태는 파괴폭이 클수록 流出量은 크고, 同一한 上部 파괴폭에 대하여 직사각형, 사다리꼴형, 삼각형순으로 流出量이 큰 것을 수치모형으로 부터도 확인할 수 있었다.

각 type 별로 임의의 댐 높이와 파괴시간이 주어졌을 때 尖頭流出量을 구하기 위하여 파괴부의 平均幅은 댐 높이의 2배로 假定하고, 파괴



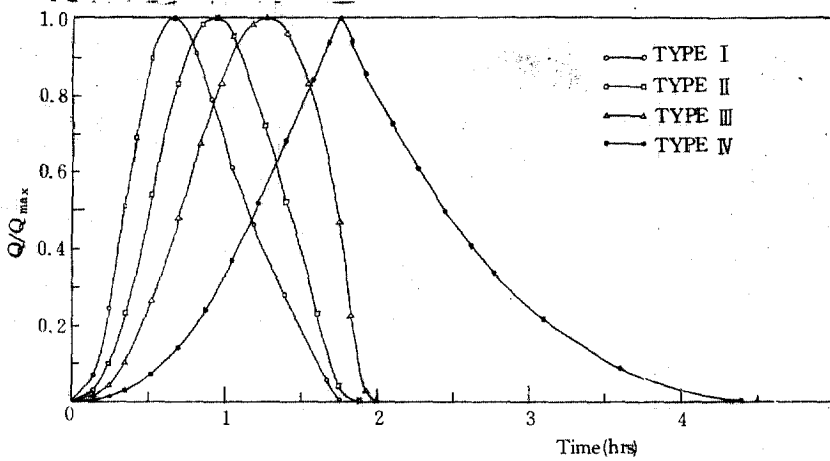


그림 6. Comparison of Dimensionless Outflow Hydrograph for Various Reservoirs

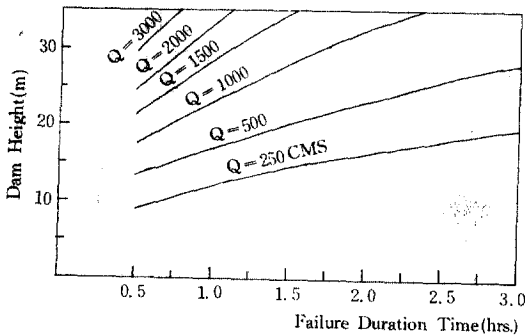


그림 7. Dam Height-Failure Duration Time-Peak Discharge Relationships (Type II)

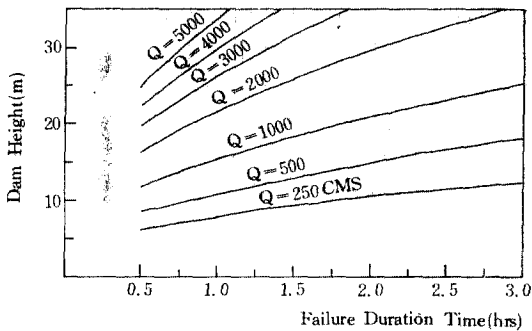


그림 8. Dam Height-Failure Duration Time-Peak Discharge Relationships (Type III)

부의 形態는 직사각형으로 하여 그 값들을 구하고 이들을 圖示하였다. 분량관계로 type II와 type III에 대하여 만들 그림 7, 8에 실었는데 임의의 댐 높이와 파괴시간에 대한 尖頭流出量을 도시한 것으로서 댐 높이가 높을수록 파괴시간

이 짧을수록 尖頭流出量은 크게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

### 5. 結 論

本 研究는 earth dam의 파괴로 인한 流出水文曲線을 解析한 것으로서 다음과 같은 몇가지 結論으로 要約할 수 있다.

1. Earth dam 파괴에 대하여 이제까지 研究, 調査된 파괴양상 및 貯溜方程式을 바탕으로 DBFW(Dam Break Flood Wave) 模型의 開發하였다.
2. 本 DBFW를 Teton과 Buffalo-Creek 댐에 適用하여 流出水文曲線을 解析하였는데 그 結果는 NWS의 調査結果와 작은 偏差로 거의 一致하고 있어 本 模型의 適用性을 立證하였다.
3. 파괴양상이 流出水文曲線에 미치는 影響은 貯水池의 地形學的 特性, 파괴부의 形態, 파괴폭, 파괴지속시간등이 큰 것으로 나타났다. 국내 earth dam을 地形學的 變數  $K$ 에 의하여 4가지의 type으로 區分하고 각각에 대한 水位-水表面積 關係曲線을 誘出한 후 임의의 댐 높이와 지속시간에 대한 尖頭流出量 및 流出水文曲線을 구할 수 있는 圖表를 提示하였다.

참 고 문 헌

1. Katopodes, N.D., and Schamber, D.R., "Applicability of Dam-Break Flood Wave Models", *J. of HY Div.*, Vol. 109, No. 5, ASCE, May, 1983, pp. 702~721.
2. Middlebrooks, T. A., "Earth-Dam Practice in the United States", *Centennial Transactions, ASCE*, Vol. CT. 1953, pp. 697~722.
3. Johnson, F.A. and Illes, P., "A Classification of Dam Failures", *Water Power and Dam Construction*, Dec. 1976, pp. 43~45.
4. U.S. Army Corps of Engineers", *National Program of Inspection of Dams*", Vol. I-I, Dept. of the Army, Washington D.C. 1975.
5. 조선일보, 1961년 7월 14일자 자료
6. 한국일보, 1980년 7월 24일자 자료
7. Dressler, R.F., "Hydraulic Resistance Effects Upon the Dam-Break Functions", *J. of Research, National Bureau of Standards*, Vol. 49, No. 3, Washington, D.C. 1952, pp. 217~225.
8. Whitham, G.B., "The Effect of Hydraulic Resistance on the Dam-Break Problem" *Proceedings, Royal Society of London*, No. 1170, Jan, 1955.
9. Su, S., and Barnes, A.H., "Geometric and Frictional Effects on Sudden Release" *J. of HY Div.*, Vol. 96, No. 11, ASCE, Nov. 1970, pp. 2185~2200.
10. US Army Engineers, "*Floods Resulting from Suddenly Breached Dam*", No. 2-374, US WES, Vicksburg, Miss. 1960, 1961.
11. Cristofano, E.A., "*Method of Computing Erosion Rate for Failure of Earthfill Dams*", US Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1965.
12. Fread, D.L., and Harbaugh, T.E., "Transient Hydraulic Simulation of Breached Earth Dams", *J. of HY Div.*, Vol. 99, No. 1, ASCE, Jan, 1973, pp. 139~154.
13. Price, J.T., Lowe, G.W., and Garrison, J.M. "Hydraulic Transient Generated by Partial and Total Failure of Large Dams", *Presented at the Aug. 1974, ASCE Hydraulics Division Specialty Conference held at Knoxville, Tenn.*
14. Brown, R.J., and Rodger, D.C., "A Simulation of the Hydraulic Events During and Following the Teton Dam Failure", *Proc. of the Dam-Break Flood Routing Workshop, Water Resources Council*, Oct. 1977.
15. Fread, D.L., "The Development and Testing of a Dam-Break Flood Forecasting Model", *Proc. of the Dam-Break Flood Routing Workshop Water Resources Council*, Oct. 1977.
16. Ponce, V.M., and Tsivoglou, A.J., "Modeling Gradual Dam Breaches", *J. of HY Div.*, Vol. 107, No. 7, ASCE, July, 1981, pp. 829~838.
17. Mac Donald, T.C., and Jennifer, L.M., "Breaching Characteristics of Dam Failures", *J. of HY Div.*, Vol. 110, No. 5, ASCE, May, 1984, pp. 567~586.
18. USCOLD/ASCE, "*Lessons from Dam Incident*", US Committee on Large Dams, New York, 1975.
19. Singh, K.P., "*Dam Safety Program*", Univ. of Illinois, Champaign, Illinois, June, 1982.
20. Ray, H.A., et al., "*The Flood in Southeastern Idaho from the Teton Dam Failure of June, 5, 1976*", USGS, Idaho, 1976.
21. Davies, W.E., et. al., "*West Virginia's Buffalo Creek Flood*", USGS, 1972.
22. Thomas, W.A., "Calculating and Routing the Teton Dam-Break Flood", *Proc. of the Dam-Break Flood Routing Workshop, Water Resource Council*, Oct. 1977.
23. 농업진흥공사, "80년도 농업 기반조성 사업 통계 연보", 1981.

(接受 : 1985. 3. 14)