

## 水資源開發計劃과 最適化手法 (I)

崔 榮 博

<本協會理事·高大理工大教授·理學博士>

### 머 리 말

最適化手法은 시스템工學이나 OR에서 널리 소개되어 있다. 最適化手法으로는 統計的手法, 試行錯誤法, 模擬(Simulation), 數值計算法등의 여러 방법이 있으나, 여기서는 基本的인 手法에서 복잡한 手法으로 순서에 따라서 또 數學的인 설명보다도 각手法의 사용도에 유의 하면서 설명코져 한다. 最適化手法을 실제의 시스템에 적용할 경우 자주 中度에서 실패를 보게되는 것은 技巧을 요하는 高度의 最適化手法이 아니고 그 시스템을 模型化해서 평가하는 방법에서이다. 이것은 매우 어려운 일이나 중요한 문제이므로 문제의 설정이나 선택규칙의 선정이라든가 最適解의 해석등 기본적인 사고방식에 대하여 여기서 검토해보고져 한다. 여기서는 또한 最適化手法이 水資源開發施設의 設計 및 施工의 어떤 過程에 있어서 어떠한 의미를 가지며 過程中的의 어떤 分野에 사용될수 있는가, 여러문제에 대해서 어떤 最適化手法을 선정하는것이 좋은가 등을 생각하는데 필요한 材料를 제공하는데 이 講座의 목적을 두었다.

### 1. 시스템概念과 시스템工學

近者 經濟成長과 함께 人間の 生産 및 生活活動은 더욱 複雜化하여가고 또한 대규모화 하고 있다. 이로서 經濟, 社會活動을 組織하고 이를 運用하는 경우 단순히 專門分野의 지식만으로서 이를 해결할수 없고 넓은 分野에 걸친 지식을 통합하고 조직적으로 事物을 생하는 방식이 필요하게 되었다. 이와같은 사고방식이 시스템概念(system concept)이라고 불리는 것으로 工學的으로는 제 2 차세계대전에 있어서 軍의 作戰計劃에

사용되어 美國 NASA(航空宇宙局)의 아폴로計劃에서 비약적발전을 하였다. 人工衛星에서 뒤져진 美國이 아폴로計劃을 완수하는 첫거름으로 大學院教育을 확충하는데 주력한것은 유망한 이야기로서 이것은 시스템工學응용의 구체적인 한 예인 것이었다.

시스템工學(system engineering)은 현재 通信·防衛·運輸·電力의 各分野는 물론 事務管理·生産管理·在庫管理등에 광범위 하게 사용 되고 있으며 水資源開發分野에서는 Harvard 大學에 있어서 水資源計劃의 시스템化에 시작하여 여러방면으로 급격히 응용되어가고 있다.

복잡하고 대규모화된 오늘날의 社會·經濟活動은 여러 많은 構成因子(component)로 성립되어 있음으로 어느 現象을 해석하고 또 어떤목적을 달성하기위해서는 이 구성인자가 선정되어 配列, 統合될 필요가 있는데 이것을 시스템(system)이라고 말할 수 있다. 따라서 이 시스템을 어떻게 구성하는가 바꾸어 말하면 시스템을 어떻게 이해하는가는 중요한 것으로서 이 檢討를 시스템解析(system analysis)이라고 부르고 있다. 또 시스템을 구성하는 意圖는 시스템을 소기의 목적을 만족시키기 위한 檢討를하는 것으로서 이것이 工學的으로 발전한것이 시스템工學(system engineering)이라는 학문이다. 예컨데 지금 물不足을 해소하고 생산고를 높여 農業經營을 安定시키는데 있어서 灌溉用水를 導水(시스템을 구성하는 意圖)하는 경우 무엇을 어떻게 고려해야하는가를 檢討하고(시스템解析) 필요로 하는 因子(시스템構成因子)를 선출하고 配列統合해서(시스템構成) 시스템을 구성한 意圖를 만족할 수 있도록 土地利用計劃, 導水計劃, 水源計劃 등을 수립하는(시스템工學的 應用)것이다. 그러면 시스템은 어떤 性能을 구비하는 것이 소망될것인가. 앞의 예에 있어서 水源計

劃은 댐을 중심으로 하는 하나의 시스템으로 생각할 수가 있다. 이 경우 댐建設費는 적은것이 소망된다. 즉 經濟性(economics)이다. 그러나 댐이 欠壞될때 유발되는 被害를 생각하면 충분히 安全해야 한다. 즉, 信賴性(reliability)이다. 또 일부러 건설된 댐은 적어도 所期の 耐用年數사이에 推砂등으로 댐의 利用效率를 저하시켜서는 안된다. 즉 有用性(usefulness)이다. 또한 같은 댐이 單一目的의만에 專用됨이 없이 洪水調節, 水力發電, 리크레이슨등에도 多目的으로 이용되는 것이 소망된다. 즉 兩立性(compatibility)이다.

이와같은 시스템의 性能은 서로 독립적으로 검토될 것이 아니고 이들의 一部 또는 全部에 그 權重을 가미하면서 시스템을 종합적으로 평가하지 않으면 안된다.

시스템을 定量的 또는 經濟的으로 평가하고 시스템을 그 목적하는바에 副應되도록 數理的으로 檢討하는 것이 最適化手法(optimization techniques)이라고 부르며 시스템 工學의 중심적 과제이다.

## 2. 시스템의 모델化

시스템을 평가하기 위하여는 對象이 되는 시스템을 모델化할 필요가 있다.

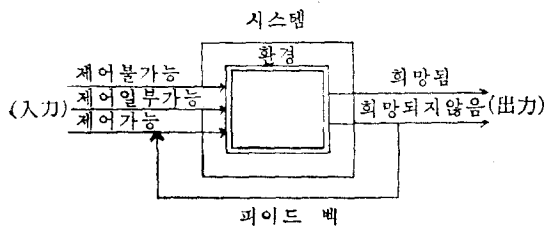


그림-1 시스템의 일반적형태

주어진 入力(input)은 시스템을 구축하는 環境(environment)이 作用하여 出力이 된다. 最適化의 목적은 시스템을 구축하는 環境하에서 소망하는 出力을 얻을 수 있는 시스템을 設計하는데 있으나 얻어진 出力이 소망스럽지 못한 경우에는 피드·백(feed back)로서 再檢討할 수가 있다.

入力이나 環境이 確定量인 경우, 確定的(deterministic)이라고 불리지며 不規則인 確率變量인 경우는 推計的(stochastic)이라고 부른다. 후자는 다시 時間의 函數인가 아닌가에 따라 非定常的(non-stationary), 定常的(stationary)으로 나누어진다. 水資源開發事業은 基

準年의 水文量만을 對象으로 設計하는 것이며 確定的 모델이라고 보아도 좋다.

시스템은 일반적으로 入力과 出力이 比例하지않은 非線型(non-linear)모델이다. 降雨(入力)~流出(出力)시스템에 있어서 流出率은 2倍의 降雨量에 대해서 2倍 이상의 流出量이 기대할수있음으로 이것은 非線型모델이다. 시스템의 全構成因子를 모델化하는것은 일반적으로 곤란하며 또한 경제적으로도 불가능함으로 全體를 매우 近似한 粗한 모델 특히 중요한 一部만 細密히 나타낸 精細한 모델 및 양자의 組合이 있다. 시스템의 모델化에 있어서 近似化의 強弱 정도가 解의 精密度를 左右하는것은 두말할것도 없다. 또 시스템전체를 한꺼번에 모델化하는것은 곤란한 경우가 많음으로 部分的으로 모델化하고 이것을 組合해서 시스템全體를 모델化하는 방법이 취해지는 경우가 많다. 이와같은 部分的 시스템은 部分 시스템(sub system)이라고 부른다.

시스템의 모델을 模擬發生裝置, Analog 計算機나 Digital 計算機에 模型的 또는 數理的으로 再現해서 시스템의 特性을 檢討하는 방법을 시뮬레이션(simulation)이라고 한다. 水理實驗, 貯水池의 收支計算, 數理모델에 의한 水理現象의 解析등은 시뮬레이션의 예이다. 또 모델을 數學的으로 定式化하여 解析的으로 또는 數值計算에 의하여 푸는 방법이 線型計劃法, 動的計劃法 등의 數值計算法(mathematical programming)이다. 이 경우 시스템의 目的 및 시스템을 구축하는 環境은 目的 函數(objective function), 拘束條件(constraint) 등으로 標式化되어서 數值計算法直後の 對象이 된다.

시스템化에는 各國마다 普及活用되고 있으며 政府豫算編成 및 配分의 合理化를 도모하기위하여 美國에서 시작되어 PPBS(Planning Programming and Budgeting System)란 이름으로 우리나라에도 導入될 단계에 있으며 이를 위하여는 政府各事業部處마다 시스템·엔지니어(system engineer)의 육성이 필요할것이다. 한편 시스템化를 위하여는 資料整理의 方法이나 평상시의 作業方法을 改善하는것도 知的生産을 向上시킨다는 것에서 우선 이것부터 시작하여 순차 그 對象을 확대할것이라고 본다.

## 3. 最適化手法

### 가. 統計的手法

우리들이 취급하는 시스템의 入力 및 그 環境은 確率의 現象일때가 많다. 이와같은 確率의 現象에 대해서 그 소기의 기능을 발휘하고 그 목적을 만족시키도록 시

스텝을 설계하지 않으면 안된다.

이때 먼저 고려되어야 할 시스템의 성능은 信賴性이다. 시스템의 信賴性은 그 經濟性을 무시하고 검토될 수 없는 것이다.

(1) 信賴性

信賴性(reliability)라는 것은 시스템이 一定한 環境 아래 一定한 時間 故障없이 그 能力을 發揮할수있는 確率이다. 여기서 말하는 故障(failure)라는 것은 시스템이 그 目的을 달성할수 없을 때이다. 洪水調節댐을 예로 들면 洪水가 그 洪水調節能力을 넘을때 本體 또는 附帶施設이 파괴할때 또는 貯水池의 推砂가 현저해서 貯水池로서의 機能이 상실할때 이다.

(가) 部材의 信賴性

構造計算에 있어서 상당한 精度로서 應力계산을 한 후 整數의 安全率을 곱하는 것에 대하여 우리는 어떤 疎外感을 가질경우가 많다. 이 安全率은 部材의 強度와 이에 作用하는 荷重이 나타나는 방식이 不確定(推計的)한 까닭에 생각된것이다. 그래서 部材의 信賴性이라는 것이 어떤것인가를 생각해 보자.

部材의 強度를  $m$ , 荷重度를  $w$ 로 할때  $w > m$ 이면 破壞가 일어난다. 그 確率  $p$ 는

$$p = P(m - w < 0) = P\left(V = \frac{m}{w} < 1\right) \dots \dots \dots (1)$$

이다. 여기서  $P(m - w < 0)$ 는  $m - w$ 가 陰數인 ( $m < w$ ) 確率을 標式化한것으로 예컨대 주사위 1개를 던져 그 나오는 눈의 數를  $X$ 로 하면  $X$ 가 4보다 작은 (1, 2, 3)의 눈의 어느것인가가 나온다) 確率은  $P(X < 4) = \frac{1}{2}$ 로 서 표시된다.

部材의 強度나 荷重의 크기는 모두 確率變量이며  $m$  및  $w$ 는 각각 固有의 確率密度函數를 가지는데 이것이 正規分布의 경우에는  $m$ 와  $w$ 사이의 관계는 그림-2로 서 나타낸다.

또 破壞가 생기는 確率  $p = \alpha$ 와 部材의 平均強度의 관계  $\mu_m^*$ 은

$$\mu_m^* = \mu_w + u_\alpha \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_w^2} \dots \dots \dots (2)$$

로서 주어진다.

여기서  $\mu_w$ : 荷重의 平均値

$\mu_m^2$ : 部材의 分散

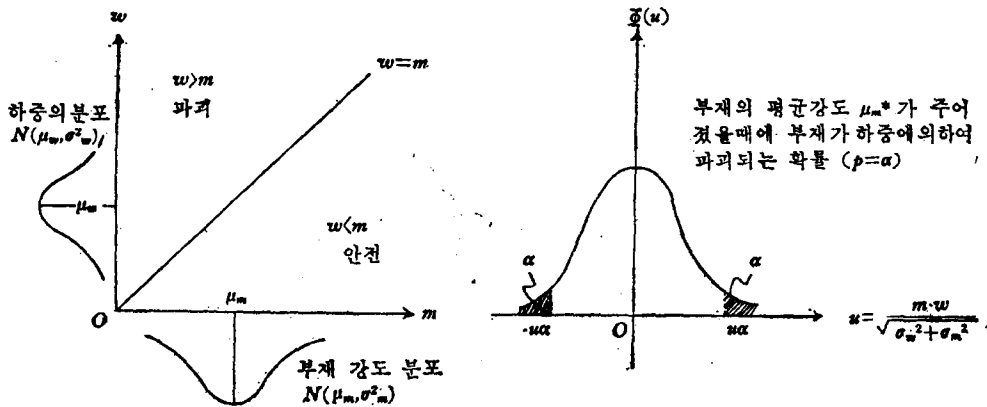


그림-2 部材의 強度와 荷重의 크기 관계

$\sigma_w^2$ : 荷重의 分散

$u_\alpha$ : 確率  $\alpha$ 를 주는 標準正規分布值 이 경우 部材의 信賴性  $r$ 은  $1 - \alpha$ 이다.

어느 部材의 強度, 여기에 作用하는 荷重이 나오는 방식이 試驗·觀測되어 各平均値, 分散  $\mu_m^*$ ,  $\mu_w$ ,  $\sigma_m^2$ ,  $\sigma_w^2$ 을 알게되면 式(2)에서  $u_\alpha$ 를 구하면 그 部材가 破壞하지않은 信賴度를 알 수 있다. 역으로 이 信賴度를 높이자면 어떤強度의 部材를 사용하는것이 좋은가를 알려준다. 部材 및 荷重은 반드시 正規分布가 된다고는

할수없으므로 一般式 및 指數分布, 對數正規分布하는 경우에 대해서 연구가 필요하다.

(나) 시스템의 信賴性

앞에서는 시스템의 한 構成因子의 信賴性을 검토하였으나 시스템 全體의 信賴性을 어떻게 나타낼수 있겠는가. 간단한 예로서 2개의 構成因子로 된 시스템 (그림-3)을 생각해보기로 한다.

直列의 경우 시스템이 故障나는 確率  $P$ 는  $A$ 가 고장나고  $B$ 가 고장나지 않은 確率  $p(1-p)$ , 또는 그 逆

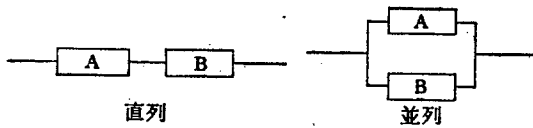


그림-3 직렬 및 並列시스템

의 確率과 A, B 함께 고장나는 確率  $p^2$ 의 합임으로

$$P = 2p(1-p) + p^2 = 2p - p^2$$

로 되고 시스템의 信賴性 R 은

$$R = 1 - P = (1 - p)^2 = r^2 < r \quad (\because r < 1)$$

로서 주어진다.

並列의 경우는 A, B 모두 함께 고장나는(故障率  $P = p^2$ )일때 임으로

$$R = 1 - P = 1 - (1 - r)^2 = 2r - r^2 > r$$

로 되어 信賴性이 높다. 일반적으로 각구성인자의 信賴性이  $r_1, r_2, \dots, r_m$  일때 직렬 시스템의 信賴性은

$$R = r_1 r_2 \dots r_m = \prod_{i=1}^m r_i \dots (3)$$

並列시스템의 信賴性은

$$P = 1 - (1 - r_1)(1 - r_2) \dots (1 - r_m)$$

$$= 1 - \prod_{i=1}^m (1 - r_i) \dots (4)$$

로서 표시된다. 물론 시스템은 並列과 직렬의 組合임으로 그 信賴性은 式(3) 및 (4)의 組合으로서 주어진다. 구성인자의 수를 많이 하면 시스템의 信賴性을 높게 하는 것은 두말할것도 없으나 시스템의 環境 및 經濟性을 고려하지 않으면 안될것은 당연하다.

## (2) 計劃基準年

水資源開發事業이나 河川改修事業計劃에 있어서는 자주 基準年에 있어서 水文量(降雨, 洪水, 有效雨量, 連續無降水日數等)을 對象으로 檢討가 進行된다. 健全한 바와 같이 시스템의 入力은 確率變量인 것이 많으므로 여러 入力에 대하여 시스템의 樣態를 검토하는것은 곤란함으로 이것을 確率的으로 검토해서 計劃의 對象으로서 妥當性이 있다고 생각되는 確率變量을 確定的 入力으로 봐서 시스템設計를 하게 된다.

지금 시스템設計의 對象으로서 妥當하다고 생각되는 確率變量은 어떤것인가, 洪水調節의 調節容量을 결정하는 경우를 예로서 설명코져 한다.

간편을 위하여 洪水被害는 피이크 洪水流量의 函數이라고 생각하자. 과거의 洪水記錄을 確率計算해서 年洪水의 超過確率을 계산하면 그림-4에 나타내는 바와 같이 年洪水의 超過確率과 年平均洪水被害額의 관계를

얻을 수 있다.

그림-4는 100年중 每年생기하는 거와같은 洪水에서는 被害는 전혀 일어나지 않으나(A점), 100年중 B年생기하는 洪水(B점)에서는 被害가 일어나기 시작하고 100年중 50年생기하는 洪水(C점)에서는 年平均被害額은 C'원 인것을 나타내고 있다.

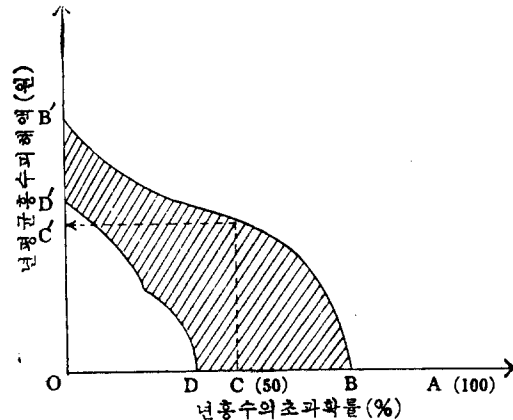


그림-4 年洪水의 超過確率과 年平均洪水被害額의 관계

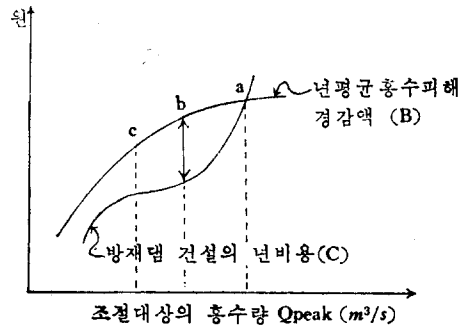


그림-5 洪水調節의 費用과 效果와의 관계

지금 피이크洪水流量  $Q_{peak}$ 인 洪水에 대해서 洪水被害를 일으키지 않도록 調節가능한 防災댐이 建設되었다고 하면 이때의 年洪水의 超過確率과 年平均洪水被害額의 관계는  $D \sim D'$ 로서 주어진다.

D점은 洪水流量  $Q_{peak}$ 의 超過確率이다. 이경우 피이크洪水流量이  $Q_{peak}$ 인 洪水에 대해서 被害를 일으키지 않도록 建設된 防災댐의 效果는 그림-4의  $B'D'DB$ 로서 포위된 범위의 年平均被害額을 輕減하는것이 된다.  $Q_{peak}$ 를 여러가지로 바꾸어서 같은 檢討를 하면 그림-5를 얻는다.

그림-5에 있어서 事業效果가 陰數가 되지않는 最大

洪水被輕減額을 주는  $a$  점, 事業效果( $B-C$ )가 最大가 되는  $b$  點, 事業效果의 比( $B/C$ )가 最大가 되는  $C$  點등이 計劃의 對象이 된다고 생각되는데 이들 選擇에 대해서는 후술할 시스템의 評價의 處에서 상세히 설명코저 한다. 지금 ( $B-C$ )가 最大인것을 最適으로 하면 本質論的으로는  $b$  點을 計劃의 對象(計劃基準年)으로 할 것이다. 그러나 이와같은 檢討는 畧然함으로 예컨대 50年 1回 생기하는 雨量을 計劃基準雨量으로 하는 것을 여기서는 이해해야 될 줄안다.

參 考 資 料

1) Maass, A & Others, Design of Water-Resources Systems, pp.620, Harvard University Ppess, 1962

2) Hall, W.A & Dracup, Water-Resources Systems Engineering, pp.372, McGraw-Hill Book Co., 1970  
 3) Au, T. & T.E Stelson, Introduction to System Engineering, pp.374, Addison-Wesley Publishing CO., 1969  
 4) 瀧保夫編, 確率統計現象 I, II (岩波講座基礎工學) pp.250, 岩波書店 1968.  
 5) Chow, V.T, Handboor. of Applied Hydralogy, pp. 26-34, McGraw-Hil Book Co., 1964  
 6) 佐佐木才朗, 水資源計劃의 手法, pp.147 日本土木學會計劃學研究委員會 1969.

<P. 85에서 계속>

영원히 소멸하고자 한 것이다. Delta Plan 은 총공사비 30억길다(원화 3,000 억원)가 소요되며 공사기간 25년으로써 1954년에 착공하였으니 1978년에는 수세기 동안의 숙원이던 간척사업을 준공하므로써 세계적인 功績을 맞이하게 될 것이다.

모든 대단위 사업이 그러하듯이 화란의 간척사업도 3M 즉 Man(인간, 기술) Material(자재), Money(자본)의 삼위일체로 이루어져 왔다.

화란의 불과의 투쟁은 전체국민의 총화로 이루어져 왔지만 사업의 방향을 인도한 토목기술자로서 Zuiderzee Project의 최종입안자 Cornelis Lely, Delta Project의 기초조사로서 유량측정과 유사량조사를 수행하고 기본계획을 수립한 젊은 토목기사 John Van Veen이 있었다.

Delta project를 위한 조사기기로서 Deltar analogue Computer(조류의 문제를 해결하기 위하여 전기와 수리 Network와의 유사성에 근거를 둔것으로써 수위의 변화와 유량의 변화를 전압과 전류의 변동으로 재현한

것)와 Echo Sounder 및 전전후 수신측정기 (제 2차 세계대전때 개발된 전파항해조직설비(radio navigation system)로써 연합군의 Normandy 상륙작전에 사용한 것) Decca Survey System 설비를 적용하였다.

또 불과 모래의 묘기이며 과학과 수리학적 공사와의 긴밀한 협조과정인 수리모형실험기관으로:1927년 이래 Delft에 Hydraulics Reseach Laboratory와 북동 polder에 있는 De Voorst에 노천수리모형 실험실을 두고 Polder 및 Delta Project의 모든 공사에 관련된 문제 및 기타 여러가지 문제를 해결하고 기술적인 발달을 기하고 있다.

Rhine, Maas 및 Sheld 강이 운반한 많은 퇴적물인 모래, 자갈 및 진흙을 발달시킨 준설기술을 적용하고 전자, 전기, 기계공업의 발달과 유럽공동시프의 관문인 년간하역량 86,583,000 톤으로 세계 제 1의 항구 Rotterdam의 무역에 힘입어 이 Delta 지역은 소위 Golden Delta로 발달할 것이다.

會 費 納 付

每年莫重한 事業을 推進하면서도 恒常會費納付가 遲延되고있어 協會運營에 많은 支障을 받고있읍니다. 여러분이 給付하는 會費는 本協會運營의 動脈이 되오니 協會財政을 十分 惠諒하시어 現在까지 未納하신 會員은 다음과 같이 早速한 時日內에 自進納付하여 주시기 바랍니다.

納付金: 年間 67年 500, 68,69年 各 600, 70,71,72年 各 1,000

納付處: 直接納付 또는 振替口座 서울 554番에 拂込하여 주시기 바랍니다.