

〈論 文〉

動的計画法에 의한 물 配分

Optimal Water Allocation by Dynamic Programming

李 舜 鐸*

Lee, Soon Tak

李 辰 雨**

Lee, Jin Woo

Abstract

This study aims at the development of a technique for the optimal water allocation by applying Dynamic Programming Model for the effective usage and rational allocation of water resources, in case of which limited water resources in river basin should be used in several stages.

In analytical procedure the possible allocable area was firstly zoned into the four areas: Pohang area(C_1), Yeungcheon area(C_2), Gyeongsan area (C_3), Daegu area(C_4), which are located between the Yeungcheon dam and the confluence of the lower Kumho river and the main course of the Nakdong river.

Secondly, a return function was determined on the basis of the correlation between the GRP in each area and the amount of water used to it.

A DP Model, finally, was applied to the allocation of the water resources according to both their usage and the areas.

As a result, the fact has been found that when allocating by the area, C_1 could be possibly supplied only with the water resources available from the Yeungchon dam, and the maximum units supplied to C_1 should be 240 units (1 unit= 10^3m^3 per day), beyond which we ought to develop an alternative water resources. Also, the return from the allocation by the usage exceeded the one from it by the area. At the same time it was more profitable to limit the water supply to C_1 into 217 units.

In the allocation by the area 240 units and 80 units, if only the water resources available from the Yeungcheon dam used, and 360 units and 80 units if the Doil dam used additionally, could be supplied to C_1 and the lower region respectively.

In the allocation by the usage 103 units for industrial water with 33 units for both domestic and commercial water and 183 units, if only the water resources available from the Yeungcheon dam used, and 103 units with 33 units and 304 units, if the Doil dam taken into consideration additionally, could be supplied to C_1 and the lower region respectively.

Therefore, much more water could be allocated to the region of lower Kumho river if the method of water allocation by the usage.

* 嶺南大學校 工科學 教授 · 工博

** 浦項實業專門大學 土木工學科

要 旨

本 研究는 河川流域에 있어서 限定된 一定의 水資源이 몇 段階로 使用될 境遇, 效果的인 水使用 및 合理的인 水配分方法에 動的計劃(Dynamic Programming)모델을 適用하여 最適 水配分量을 決定하고자 하는데 그 目的이 있다.

分析에 있어서는 水配分 可能地區를 永川댐을 中心으로 하는 琴湖江 下流 洛東江 本流 合流點까지의 浦項地區(C₁)·永川地區(C₂)·慶山地區(C₃)·大邱地區(C₄)인 4個 地區로 區分하고, 이들 各 地區別 區域內 住民總生産과 用途別 水使用量資料의 相關關係로부터 利益函數를 決定하여, 地區別 水配分과 用途別 水配分으로 區分하여 DP 모델을 適用시켰으며, 그 結果 地區別 水配分에서 C₁ 地區의 用水量 制限없이 配分할 時 240units(1unit=10³m³/日)까지는 永川댐의 可用水資源量만으로 供給이 可能하나 그 以上이 될 境遇에는 代替水資源을 開發해야 됨을 알 수 있었고, 用途別로 配分할 時의 利益이 地區別로 配分할 時의 利益보다 많이 나타남과 동시에 可用水資源量의 217units까지는 C₁ 地區의 用水量 制限시키는 것이 利益이 크다는 점을 알 수 있었다.

地區別로 水配分할 時 永川댐만의 可用水資源量으로는 C₁ 地區에 240units, 下流地區에 80units로 配分되었고 永川댐 上流 道日댐을 考慮할 境遇 C₁ 地區에 360units, 下流地區에 80units로 配分되었으며, 用途別로 水配分할 時 永川댐만의 可用水資源量으로는 C₁ 地區의 工業·生活用水는 103units, 33units로 配分되고, 下流地區에 184units로 配分되었으며 道日댐을 考慮할 境遇 C₁ 地區의 工業·生活用水는 103units, 33units로 配分되고, 下流地區에 304units로 配分되었다. 따라서 用途別로 水配分하므로써 琴湖江 下流地域에 더욱 많은 물을 配分할 수 있음을 알았다.

1. 序 論

急速한 經濟成長과 人口의 增加 및 生活水準 向上으로 인하여 各種 用水需要의 急激한 增大를 초래함에 따라서 效果的이고 合理的인 水資源管理과 그 利用의 效果를 極大化하기 위하여 最適化方法에 의한 最適運營管理의 必要性이 切實히 要求되고 있다.

最適化 方法의 分析技法으로서는 一般的으로 線型計劃法(LP), 非線型計劃法(NLP), 動的計劃法(DP) 등이 있는데 이들 分析技法 가운데 水資源시스템의 運營問題에 있어서, 最適化 問題들을 解析하기에는 動的計劃모델이 아주 有力하고, 一般的인 接近方法으로 지금까지의 研究結果 밝혀지고 있다.

따라서 限定된 一定의 資源이 있을 때 이것이 몇 段階로 使用될 경우, 어떠한 配分方式이 좋은가라는 問題와 이 時의 利益을 最大로 하는 問題는 여러가지 數學的인 모델을 考慮해 볼 수 있겠으나 一般的으로 動的計劃¹⁾²⁾ 모델을 適用하는 것이 가장 妥當할 것으로 생각된다.

最適化의 原理에 基礎를 둔 多段階 最適化手法인 動的計劃法은 線型計劃法³⁾과 같은 다른 數理計劃法과는 달리 動的計劃 問題의 標準 數理모델의 형성이 存在하지 않으며 問題에 따라 各 分野마다 그 問題의 特性에 맞는 數理的 關係式들을 開發해야 하는 것이 특

徵이다.

動的計劃法은 처음 Richard Bellman⁴⁾⁵⁾⁶⁾과 RAND 研究所의 研究員에 의해 紹介되었고 發展되었으며 주로 經營學分野에서 많이 應用되어 왔다.

水資源시스템 分野에 있어서는 最近에 몇몇 사람들에 의하여 그 適用 및 모델들이 開發된 바 있다. 즉, Buras⁷⁾에 의하여 水資源開發에 있어서의 DP의 適用에 관한 紹介와 Butcher⁸⁾ 등에 의한 DP의 適用以後 여러가지 形態의 모델들이 開發되었다. Kaplan 및 Haines⁹⁾는 下水處理場의 最適容量 擴張을 위한 DP 모델을 開發하였으며 Heidari 및 Chow¹⁰⁾ 등은 水資源시스템의 最適화를 위한 DDDP(Discrete Differential Dynamic Programming)모델을 開發한 바 있다. 또한 Larson¹¹⁾¹²⁾¹³⁾ 및 Kecker¹⁴⁾¹⁵⁾는 水資源시스템의 調節을 위한 DP의 各種 應用모델을 紹介함과 동시에 SIDP(State Increment Dynamic Programming)모델을 開發하였다. 그의 이 DP 모델로서 確率制約 DP(Chance Constrained Dynamic Programming) 모델이나 推計學的 DP 모델(Stochastic Dynamic Model) 등이 開發되고 있다. 이와 같이 DP의 基本原理에 基礎를 둔 여러가지 形態의 모델들이 水資源의 問題中 貯水池調節, 水配分, 施設容量決定 問題등의 各 分野에 걸쳐서 應用, 開發되고 있다.

한편 우리나라에 있어서는 水資源開發의 最適화에 대한 이 DP 모델의 應用에 있어서 裴相根·李舜鐸¹⁶⁾¹⁷⁾에

의하여 用水供給設施의 最適化를 開發한 바가 있을 뿐 대개 在來의 最適化 理論을 使用하고 있는 실정이다.

따라서 本 研究에서는 DP 모델에 의한 最適물配分量의 決定을 爲한 DP 모델의 開發에 그 目的을 두고 있다.

2. 물配分을 위한 動的計劃모델

一般的인 形態로 動的計劃法 問題를 그림-1에 나타낸 바와 같이 물配分 可能한 地區 C_1, C_2, \dots, C_N 에 供給할 수 있는 可用水資源量이 Q units 以下일 때, 이것을 N 개의 地區에 물을 最適配分하여 最大利益을 얻는 데는 어떻게 配分해야 할 것인가라는 물配分問題에 適用하기로 한다.



그림 1. 물配分計劃圖

여기서 $x_i (i=1, 2, \dots, N)$ 는 $C_i (i=1, 2, \dots, N)$ 번째 地區에 配分되는 물의 量(units)이고, $g_i(x_i)$ 는 x_i units의 量을 C_i 地區에 配分했을 때 얻어지는 利益으로 하면, C_i 地區에 水量 x_i units를 配分했을 때의 利益 $g_1(x_1), g_2(x_2), \dots, g_n(x_n)$ 는 알 수 있다.

따라서 問題는 制約條件

$$\sum_{i=1}^N x_i \leq Q \dots\dots\dots (2.1)$$

下에서 利益 $f_n(Q)$ 를

$$f_n(Q) = \text{Max}_{x_i} [g_1(x_1) + g_2(x_2) + \dots + g_n(x_n)] \dots\dots\dots (2.2)$$

$$x_i \geq 0, i=1, 2, \dots, N$$

最大로 豫想하는 x_i units ($i=1, 2, \dots, N$)를 求하는 것이다.

이 問題는 먼저 第1段階 C_1 地區에 대하여서는 아래 (2.3)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_1(q) = \text{Max}[g_1(x_1)] \dots\dots\dots (2.3)$$

$$0 \leq x_1 \leq q$$

$$0 \leq q \leq Q$$

이 段階에서 $f_1(q)$ 를 最大로 하는 x_1 units와 이 때의 $f_1(q)$ 를 구한다.

第2段階인 C_2 地區에 대하여 取水地點 G_1 을 通過한 後의 q 를 (2.4)식과 같이 $f_2(q)$ 가 最大가 되도록 x_2

와 $x_1 = q - x_2$ 에 配分한다.

$$f_2(q) = \text{Max}[g_2(x_2) + f_1(q - x_2)] \dots\dots\dots (2.4)$$

$$0 \leq x_2 \leq q$$

$$0 \leq q \leq Q$$

점차로 段階를 늘여 進行함에 따라 實際 計算過程에서 (2.5)식과 같은 循環方程式(Recursive equation)을 얻게 된다.

$$f_n(q) = \text{Max}[g_i(x_i) + f_{i-1}(q - x_i)] \dots\dots\dots (2.5)$$

$$0 \leq x_i \leq q$$

$$0 \leq q \leq Q \quad i=1, 2, \dots, N$$

즉, 각 段階가 最適이 되도록 $f_1(q), f_2(q), \dots, f_n(q)$ 를 求하여 가변 $x_i (i=1, 2, \dots, N)$ 의 量이 어떻게 定하여지더라도 $(q - x_i)$ 를 最適配分했을 때의 最大利益 $f_{i-1}(q - x_i)$ 가 求하여져 있으므로 x_i 와 $(q - x_i)$ 의 配分을 最適으로 하도록 정하기만 한다면 全體로서의 配分은 最適으로 되어 있는 것으로 된다.

따라서 물配分問題에 動的計劃法은 配分個所를 1, 2, 3, ..., N , 個所로 차츰 늘여가고 可用水資源量의 크기도 1, 2, ..., Q units로 차츰 크게하여 段階의 最適決定을 進行하여 尙으로서 最終의 總可用水資源量에 대한, 그리고 모든 配分可能한 地區에 대한 配分方法을 計算하도록 한다.

3. 물配分計劃 分析

3.1 利益函數의 分析

利益函數의 決定을 위한 分析資料로는 慶尙北道 各 地區別 區域內 住民總生産(不變市場價格¹⁾)과 各 地區別 用途別 물使用量 資料²⁾를 採擇하였다.

물配分地區 및 用途를 取水源인 永川 地點 上流의 浦項市 生活用水·工業用水와 下流 洛東江 本流 合流點까지의 琴湖江 沿邊에서 取水하고 있는 永川地區의 農業用水·工業用水·生活用水, 慶山地區의 農業用水·工業用水·生活用水, 大邱地區의 農業用水·工業用水·生活用水로 區分하기로 하며, 各 地區에서 물을 利用하므로써 얻어지는 利益을 決定하기 위해서 各 地區別 區域內 住民總生産(表-1)과 물使用量(表-2)과의 相關關係로부터 1次函數·2次函數 및 指數函數를 求하여 百分率變差 및 χ^2 檢定을 하였으며, 이 檢定의 結果로부터 가장 適合한 函數들을 採擇하여 물配分을 위한 利益函數로 決定하기로 하며, 地區別配分 利益函數는 表-3과 그림-2에 나타내었고, 用途別配分 利益函數는 表-4와 그림-3에 나타내었으며 이 地區別配分 利益函數 및 用途別配分 利益函數를 물配分을 爲한 動的計劃 모델에 適用시키기로 한다.

表-1 區域內 住民總生產¹⁾

單位：10⁷ 원

地 區	年度 産業	1975	1976	1977	1978	1979	1980
		浦 項	工業 生活 計	29.84 6.37 36.22	49.74 8.24 57.78	58.78 10.83 59.61	68.80 12.93 81.73
永 川	農業 工業 生活 計	5.86 0.59 1.88 8.33	5.57 0.43 2.05 8.05	6.19 0.43 2.31 8.93	7.70 0.67 2.33 10.70	6.49 1.03 2.35 9.87	4.69 1.45 2.93 9.07
慶 山	農業 工業 生活 計	5.26 4.96 2.44 12.66	5.05 7.41 4.13 16.59	5.62 8.61 3.10 17.33	5.80 8.52 3.67 17.99	5.98 12.09 5.69 23.76	4.50 8.41 7.35 20.26
大 邱	農業 工業 生活 計	3.24 45.90 66.86 116.00	3.51 43.31 61.15 107.97	3.62 57.20 76.06 136.88	3.76 52.68 88.52 144.96	3.54 64.77 91.38 159.69	3.82 67.93 86.53 158.28

1) 不變市場價格인.

表-2 用水使用量

單位：10³m³/日

地 區	年度 用途	1975	1976	1977	1978	1979	1980
		浦 項	工業 生活 計	31.70 10.60 42.30	46.80 9.80 56.60	60.80 18.00 78.80	64.20 18.00 82.20
永 川	農業 工業 生活 計	40.20 7.30 1.70 49.20	40.20 8.40 2.30 50.90	44.40 9.20 3.60 57.20	48.70 10.40 3.80 62.90	48.70 12.20 4.00 64.90	48.70 13.00 4.50 66.20
慶 山	農業 工業 生活 計	143.20 11.50 0.20 154.80	148.20 13.30 0.90 161.90	156.20 14.60 0.50 171.30	157.80 16.50 0.60 174.90	157.80 19.40 0.60 177.80	157.80 20.70 1.60 180.10
大 邱	農業 工業 生活 計	142.00 20.90 178.60 341.50	142.00 24.20 194.30 360.50	155.10 26.60 224.50 404.20	157.30 39.00 242.40 429.70	162.40 35.20 286.10 483.70	162.40 37.60 303.50 503.50

이때 利益函數는 利益變數인 住民總生產을 Y, 決定 變數인 水使用量을 x로 表示하였으며 그 相關關係 檢 定의 結果, 地區別 配分인 경우 浦項은 2次函數, 其他 地區는 1次函數로, 또한 用途別 配分인 경우 浦項의 工業用水만 2次函數이고 浦項의 生活用水 및 其他地 域의 경우 모두 1次函數가 最適임이 判明되었다.

表-3 地區別配分 利益函數

地 區	利 益 函 數
浦 項	$y = 15.84 + 0.33x + 0.01x^2$
永 川	$y = 3.17 + 0.1x$
慶 山	$y = -37.77 + 0.33x$
大 邱	$y = 2.75 + 0.31x$

表-4 用途別配分 利益函數

地 區	用 途	利 益 函 數
浦 項	工 業	$y = 20.13 + 0.003x + 0.011x^2$
	生 活	$y = 2.46 + 0.515x$
永 川	農 業	$y = 3.085 + 0.066x$
	工 業	$y = -0.83 + 0.159x$
	生 活	$y = 1.324 + 0.297x$
慶 山	農 業	$y = 2.094 + 0.021x$
	工 業	$y = 0.633 + 0.481x$
	生 活	$y = 2.26 + 3.27x$
大 邱	農 業	$y = 2.35 + 0.008x$
	工 業	$y = 14.17 + 1.41x$
	生 活	$y = 26.42 + 0.22x$

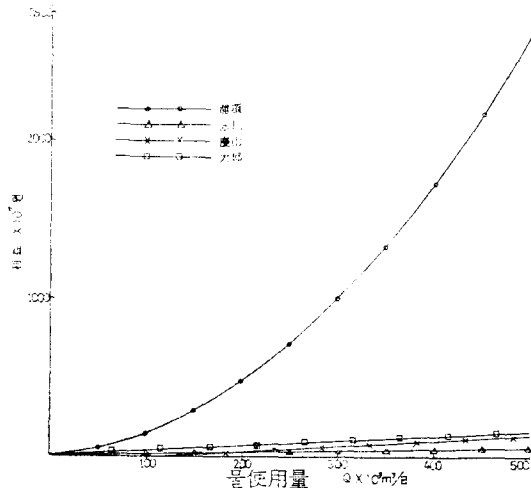


그림-2 地區別 水使用量에 對한 利益

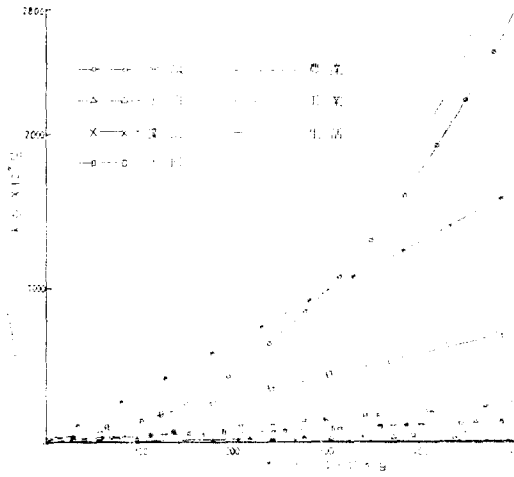


그림-3 用途別 물使用量에 對한 利益

3.2 動的計劃모델의 適用

첫째, 地區別 물配分に 있어서 물配分 가능한 地區를 浦項地區, 永川地區, 慶山地區, 大邱地區를 C_1, C_2, C_3, C_4 인 4 個地區로 區分하고 각 地區에 配分되는 물의 量을 각각 x_1, x_2, x_3, x_4 units 와 河川維持用水를 M 로 決定하기로 한다.

둘째, 用途別 물配分計劃에서는 浦項地區에 工業用水·生活用水, 永川地區에 農業用水·工業用水·生活用水, 慶山地區에 農業用水·工業用水·生活用水, 大邱地區에 農業用水·工業用水·生活用水로 區分하여 配分하고 각각의 用途에 配分되는 물의 量을 $x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{31}, x_{32}, x_{33}, x_{41}, x_{42}, x_{43}$ 와 河川維持用水를 M 로 決定하기로 한다.

한편 可用水資源은 永川댐에서의 水資源生産量에 해당하는 $320,000m^3/日$ 과 可能水資源開發地點인 永川댐 上流地點의 道日댐을 考慮한 $440,000m^3/日$ 을 可用水資源總量으로 하며, 이 可用水資源總量의 $10^3m^3/日$ 을 1 unit 의 基本單位로 決定하여 $440,000m^3/日$ 을 0~440 units 까지 점차 水량을 增加시키면서 變化시키고, 또한 單位用水量을 使用하므로써 얻어지는 利益은 1,000 萬원을 基本으로 하여 DP 모델에 適用시켜 最適變化를 反復토록 하였다. 즉, 永川댐 可用水資源量으로 각 地區에 配分할 경우에는 $\sum_{i=1}^n x_i \leq 320$ units 가 되고, 永川댐과 道日댐을 合한 可用水資源量을 配分할 경우에는 $\sum_{i=1}^n x_i \leq 440$ units 가 된다.

여기에서는 모든 段階에 걸쳐 永川댐과 道日댐을 合한 440 units 까지 可用水量을 늘려 DP 모델에 適用시

킨다.

첫째, 地區別 물配分の 第1 段階인 C_1 地區에 適用시키면 式(2.3)에 의해서 다음과 같이 計算된다.

第1 段階 計算過程

$$\begin{aligned} f_1(0) &= \text{Max}[g_1(0)] \\ f_1(1) &= \text{Max}[g_1(1)] \\ &\vdots \\ f_1(440) &= \text{Max}[g_1(440)] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

이 段階에서 Q units(440 units)의 可用水資源總量을 0 units 에서 440 units 까지 變化시키면서 配分했을 때 C_1 地區의 最適配分量 x_1 units 와 이때의 利益 $f_1(q)$ 를 計算하게 된다.

다음 第2 段階인 C_2 地區에서는 式(2.4)에 따라 計算을 行하게 되며 이 段階에서도 역시 Q units(440 units)의 可用水資源總量을 0 units 에서 440 units 까지 變化시키면서 配分했을 때 C_2 地區의 最適配分量 x_2 units 와 이때의 利益 $f_2(q)$ 를 反復하여 計算하게 된다.

第2 段階 計算過程

$$\begin{aligned} f_2(0) &= \text{Max}[g_2(x_2) + f_1(0 - x_2)] \\ f_2(1) &= \text{Max}[g_2(x_2) + f_1(1 - x_2)] \\ &\vdots \\ f_2(440) &= \text{Max}[g_2(x_2) + f_1(440 - x_2)] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

$$f_2(440) = \text{Max} \begin{cases} g_2(0) + f_1(440) \\ g_2(1) + f_1(439) \\ \vdots \\ g_2(440) + f_1(0) \end{cases}$$

점차 段階를 增加시켜 進行함에 있어 循環方程式(Recursive equation)인 式(2.5)를 利用하여 計算을 進行시키면서 C_3, C_4 地區의 最適配分量 x_3, x_4 units 와 이때의 利益 $f_3(q), f_4(q)$ 를 反復하여 計算한다.

이와 같이 段階를 增加시키면 그 計算過程이 複雜해지고 計算量이 急激히 增加하므로 이 計算을 Computer로 實行하였으며 Computer의 計算過程은 그림-4의 Flow chart 와 같다.

둘째, 用途別 물配분에 있어서 浦項地區에 工業·生活用水인 2 個 段階, 永川地區에 農業·工業·生活用水인 3 個 段階, 慶山地區에 農業·工業·生活用水인 3 個 段階, 大邱地區에 農業·工業·生活用水인 3 個 段階로 區分하여 總段階數를 11 段階로 增加시켜서 DP 모델에 適用한다.

따라서 計算過程은 地區別 配分에서와 마찬가지로 그림-4의 Flow chart 와 같이 Computer를 利用하여 實行하였다.

第1段階 計算過程

$$\left. \begin{aligned} f_{11}(0) &= \text{Max}[g_{11}(0)] \\ f_{11}(1) &= \text{Max}[g_{11}(1)] \\ &\vdots \\ f_{11}(440) &= \text{Max}[g_{11}(440)] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.3)$$

第2段階 計算過程

$$\left. \begin{aligned} f_{12}(0) &= \text{Max}[g_{12}(x_{12}) + f_{11}(0 - x_{12})] \\ f_{12}(0) &= \text{Max}[g_{12}(0) + f_{11}(0)] \\ f_{12}(1) &= \text{Max}[g_{12}(x_{12}) + f_{11}(1 - x_{12})] \\ f_{12}(1) &= \text{Max} \begin{cases} g_{12}(0) + f_{11}(1) \\ g_{12}(1) + f_{11}(0) \end{cases} \\ &\vdots \\ f_{12}(440) &= \text{Max}[g_{12}(x_{12}) + f_{11}(440 - x_{12})] \\ f_{12}(440) &= \text{Max} \begin{cases} g_{12}(0) + f_{11}(440) \\ g_{12}(440) + f_{11}(0) \end{cases} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.4)$$

第11段階 計算過程

$$\left. \begin{aligned} f_{43}(0) &= \text{Max}[g_{43}(x_{43}) + f_{42}(0 - x_{43})] \\ f_{43}(0) &= \text{Max}[g_{43}(0) + f_{42}(0)] \\ f_{43}(1) &= \text{Max}[g_{43}(x_{43}) + f_{42}(1 - x_{43})] \\ f_{43}(1) &= \text{Max} \begin{cases} g_{43}(0) + f_{42}(1) \\ g_{43}(1) + f_{42}(0) \end{cases} \\ &\vdots \\ f_{43}(440) &= \text{Max}[g_{43}(x_{43}) + f_{42}(440 - x_{43})] \\ f_{43}(440) &= \text{Max} \begin{cases} g_{43}(0) + f_{42}(440) \\ g_{43}(440) + f_{42}(0) \end{cases} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.6)$$

위의 計算過程에서 可用水資源總量의 變化에 따른 最適分量 $x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{31}, x_{32}, x_{33}, x_{41}, x_{42}, x_{43}$ 와 그 때의 $f_{11}(q), f_{12}(q), f_{21}(q), f_{22}(q), f_{23}(q), f_{31}(q), f_{32}(q), f_{33}(q), f_{41}(q), f_{42}(q), f_{43}(q)$ 를 計算한다.

3.3 結果의 考察

地區別 물配分을 위한 利益函數를 Computer 에 入力시켜 地區別로 配分한 結果 表-5 와 같이 配分되었다.

表-5. 地區別 물配分

可用水量 10 ³ m ³	最適配分					最大利益 10 ⁷ 원	備考
	M	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄		
215	40	135	5	15	20	218.68	
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	
300	40	220	5	15	20	546.78	永川댐
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	
320	40	240	5	15	20	644.98	
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	
400	40	320	5	15	20	1117.78	永川댐 +
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	
440	40	360	5	15	20	1402.18	道口댐

여기서 永川댐만의 可用水資源量 320 units 를 DP 모델에 適用시킬 때 配分된 量은 C₁ 地區의 x₁ 은 240 units, C₂ 地區의 x₂ 는 5 units, C₃ 地區의 x₃ 는 15 units, C₄ 地區의 x₄ 는 20 units 로 配分되었으며(그림-5), 이때의 最大利益으로는 644.98 × 10⁷ 원이 되었다.

한편 道口댐의 可用水資源을 考慮한 可用水資源總量 440 units 를 變化시켜 보면 C₁ 地區의 x₁ 은 360 units, C₂ 地區의 x₂ 는 5 units, C₃ 地區의 x₃ 는 15 units, C₄ 地區의 x₄ 는 20 units 로 配分되었으며(그림-6), 이 때의 最大利益은 1402.18 × 10⁷ 원이 되었다. 즉, 地區別 물使用量에 대한 利益이 그림-2 에 나타난 바와 같이 C₁ 地區에서의 물使用量에 대한 利益이 他地區에서의

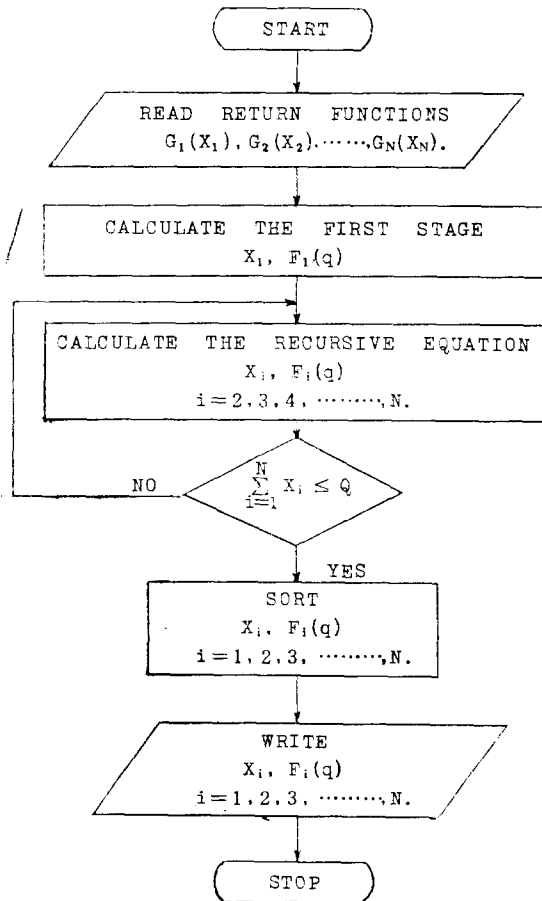


그림-4 Flow Chart

물使用量에 대한 利益보다는 훨씬 많은 利益을 얻을 수 있기 때문에 C₁地區로 물配分量이 增加될 뿐 他地區에서는 물配分量의 變化가 없음을 보여주고 있다. 그래서 C₁地區의 用水를 140 units, 160 units, 180 units, 200 units, 250 units로 각각 用水供給量을 制限시키면서 地區別로 물配分을 한 結果 表-6과 같이 나타냈다. 이와같이 C₁地區의 用水를 制限없이 供給시킬 경우 240units 以上으로 供給할 때는 永川댐만의 可用水資源量만으로는 用水供給이 不足하므로 道日댐을 考慮해야 함을 나타내고 있다.

用途別 물配分을 위한 利益函數를 入力시켜 각각의 用途別로 물配分을 한 結果 表-7과 같이 配分되었으며 永川댐의 可用水資源만으로는 C₁地區의 x₁₁, x₁₂는 103 units, 33 units, C₂地區의 x₂₁, x₂₂, x₂₃는 5 units, 4 units, 5 units, C₂地區의 x₃₁, x₃₂, x₃₃는 18 units, 7 units, 8 units, C₄地區의 x₄₁, x₄₂, x₄₃는 21 units, 72 units, 4 units로 各各 配分되었으며(그림-7), 이 때의 最大利益은 1647.88×10⁷ 원으로 나타났다.

한편 道日댐을 考慮한 可用水資源量을 각각의 用途別로 물配分을 한 結果 C₁地區의 x₁₁, x₁₂는 103 units, 33 units, C₂地區의 x₂₁, x₂₂, x₂₃는 5 units, 4 units, 5 units, C₃地區의 x₃₁, x₃₂, x₃₃는 18 units, 7 units, 8 units, C₄地區의 x₄₁, x₄₂, x₄₃는 21 units, 192 units, 4 units로 각각 配分(그림-8)됨과 동시에 利益은 2183.03×10⁷ 원이 되었다.

또한 C₁地區의 用水를 140 units, 160 units, 180 units, 200 units, 250 units로 각각 用水供給量을 制限시키면서 用途別로 물配分을 한 結果 表-8와 같이 나타냈다.

그림-9는 可用水資源量을 地區別로 配分했을 때 나타나는 利益과 用途別로 配分했을 때 나타나는 利益이다. 이들 두 利益을 比較하면 用途別로 配分할 때의 利益이 地區別로 配分할 때의 利益보다 크게 나타남을 보

表-6 浦項用水 制限供給時의 地區別 물配分

a) 浦項用水가 140 units인 경우

可用水量	最 適 配 分				最大利益	備 考
10 ³ m ³	M	x ₂	x ₃	x ₄	10 ⁷ 원	
80	40	5	15	20	-20.94	永川댐
∫	"	"	∫	"	∫	
180	40	5	115	20	12.06	永川댐 + 道日댐
∫	"	"	∫	"	∫	
300	40	5	235	20	51.66	

여주고, 用途別로 配分했을 때의 利益에서는 可用水資源量이 217 units 以下일 때는 C₁地區의 用水를 除外시킨 利益이 크다. 즉, 可用水資源량의 217 units까지는 C₁地區의 用水를 制限시키는 편이 利益이 크다는 점을 보여주고 있다.

b) 浦項用水가 160 units인 경우

可用水量	最 適 配 分				最大利益	備 考
10 ³ m ³	M	x ₂	x ₃	x ₄	10 ⁷ 원	
80	40	5	15	20	-20.94	永川댐
∫	"	"	∫	"	∫	
160	40	5	95	20	5.46	永川댐 + 道日댐
∫	"	"	∫	"	∫	
280	40	5	215	20	45.06	

c) 浦項用水가 180 units인 경우

可用水量	最 適 配 分				最大利益	備 考
10 ³ m ³	M	x ₂	x ₃	x ₄	10 ⁷ 원	
80	40	5	15	20	-20.94	永川댐
∫	"	"	∫	"	∫	
140	40	5	75	20	-1.14	永川댐 + 道日댐
∫	"	"	∫	"	∫	
260	40	5	195	20	38.46	

d) 浦項用水가 200 units인 경우

可用水量	最 適 配 分				最大利益	備 考
10 ³ m ³	M	x ₂	x ₃	x ₄	10 ⁷ 원	
80	40	5	15	20	-20.94	永川댐
∫	"	"	∫	"	∫	
120	40	5	55	20	-7.74	永川댐 + 道日댐
∫	"	"	∫	"	∫	
240	40	5	175	20	31.86	

e) 浦項用水가 220 units인 경우

可用水量	最 適 配 分				最大利益	備 考
10 ³ m ³	M	x ₂	x ₃	x ₄	10 ⁷ 원	
80	40	5	15	20	-20.94	永川댐
∫	"	"	∫	"	∫	
100	40	5	35	20	-14.34	永川댐 + 道日댐
∫	"	"	∫	"	∫	
220	40	5	155	20	25.26	

f) 浦項用水가 250 units 인 경우

可用水量	最適配分				最大利益	備考
10 ³ m ³	M	x ₂	x ₃	x ₄	10 ⁷ 원	
80	40	5	15	20	-20.94	永川댐 + 道日댐
∫	"	"	∫	"		
190	40	5	125	20	15.36	

表-7 用途別 물配分

可用水量	最適配分												最大利益	備考
10 ³ m ³	M	x ₁₁	x ₁₂	x ₂₁	x ₂₂	x ₂₃	x ₃₁	x ₃₂	x ₃₃	x ₄₁	x ₄₂	x ₄₃	10 ⁷ 원	
215	40	103	32	3	1	1	13	1	1	13	3	4	208.77	永川댐
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
300	40	103	33	5	4	5	18	1	8	21	12	50	1556.76	
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	永川댐 + 道日댐
320	40	103	33	5	4	5	18	7	8	21	72	4	1647.88	
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
400	40	103	33	3	4	5	18	7	8	21	12	146	1934.86	
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	2183.03
440	40	103	33	5	4	5	18	7	8	21	192	4		

表-8 浦項用水 制限供給時의 用途別 물配分

a) 浦項用水가 140 units 인 경우

可用水量	最適配分										最大利益	備考
10 ³ m ³	M	x ₂₁	x ₂₂	x ₂₃	x ₃₁	x ₃₂	x ₃₃	x ₄₁	x ₄₂	x ₄₃	10 ⁷ 원	
80	40	3	1	1	13	1	1	13	3	4	55.47	永川댐
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
100	40	3	3	3	13	4	4	15	11	4	154.48	
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	永川댐 + 道日댐
180	40	3	3	3	14	4	93	13	3	4	346.42	
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
250	40	3	3	3	14	4	161	15	3	4	514.09	
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	640.72
300	40	3	3	3	14	4	213	13	3	4		

b) 浦項用水가 160 units 인 경우

可用水量	最適配分										最大利益	備考
10 ³ m ³	M	x ₂₁	x ₂₂	x ₂₃	x ₃₁	x ₃₂	x ₃₃	x ₄₁	x ₄₂	x ₄₃	10 ⁷ 원	
80	40	3	1	1	13	1	1	13	3	4	55.47	永川댐
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
100	40	3	3	3	13	4	4	15	11	4	154.48	
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	297.37
160	40	3	3	3	14	4	73	13	3	4		

可用水量	最 適 配 分										最大利益	備 考	
10 ³ m ³	M	x ₂₁	x ₂₂	x ₂₃	x ₃₁	x ₃₂	x ₃₃	x ₄₁	x ₄₂	x ₄₃	10 ⁷ 원		
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	永川댐 + 道日댐
250	40	3	3	3	14	4	161	15	3	4	514.09		
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	永川댐 + 道日댐
280	40	3	3	3	14	4	213	13	3	4	640.72		

c) 浦項用水가 180 units 인 경우

可用水量	最 適 配 分										最大利益	備 考
10 ³ m ³	M	x ₃₁	x ₂₂	x ₂₃	x ₃₁	x ₃₂	x ₃₃	x ₄₁	x ₄₂	x ₄₃	10 ⁷ 원	
80	40	3	1	1	13	1	1	13	3	4	55.47	永川댐
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
100	40	3	3	3	13	4	4	15	11	4	154.48	
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
140	40	3	3	3	14	4	53	13	3	4	248.32	永川댐 + 道日댐
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
230	40	3	3	3	14	4	141	15	3	4	465.04	
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
260	40	3	3	3	14	4	173	13	3	4	542.62	

d) 浦項用水가 200 units 인 경우

可用水量	最 適 配 分										最大利益	備 考
10 ³ m ³	M	x ₂₁	x ₂₂	x ₂₃	x ₃₁	x ₃₂	x ₃₃	x ₄₁	x ₄₂	x ₄₃	10 ⁷ 원	
80	40	3	1	1	13	1	1	13	3	4	55.47	永川댐
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
100	40	3	3	3	13	4	4	15	11	4	154.48	
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
120	40	3	3	3	14	4	33	13	3	4	199.27	永川댐 + 道日댐
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
200	40	3	3	3	14	4	113	13	3	4	395.47	
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
240	40	3	3	3	14	4	153	13	3	4	493.57	

e) 浦項用水가 220 units 인 경우

可用水量	最 適 配 分										最大利益	備 考
10 ³ m ³	M	x ₂₁	x ₂₂	x ₂₃	x ₃₁	x ₃₂	x ₃₃	x ₄₁	x ₄₂	x ₄₃	10 ⁷ 원	
80	40	3	1	1	13	1	1	13	3	4	55.47	永川댐
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
90	40	3	3	3	13	4	4	13	3	4	145.12	
∫	"	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
100	40	3	3	3	13	4	4	15	11	4	154.48	

可用水量	最 適 配 分										最大利益	備 考
$10^3 m^3$	M	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{41}	x_{42}	x_{43}	10^7 원	
∫	∥	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	永 川 댐 + 道 日 댐
180	40	3	3	3	14	4	93	13	3	4	346.42	
∫	∥	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
220	40	3	3	3	14	4	133	13	3	4	444.52	

f) 浦項用水가 250 units 인 경우

可用水量	最 適 分 配										最大利益	備 考
$10^3 m^3$	M	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{41}	x_{42}	x_{43}	10^7 원	
80	40	3	1	1	13	1	1	13	3	4	55.47	永 川 댐 + 道 日 댐
∫	∥	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
140	40	3	3	3	14	4	53	13	3	4	248.32	
∫	∥	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	
190	40	3	3	3	14	4	101	15	3	4	366.94	

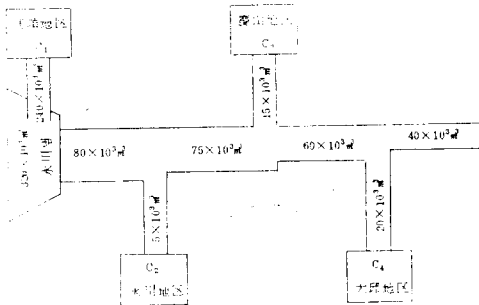


그림-5. 地區別 물配分圖

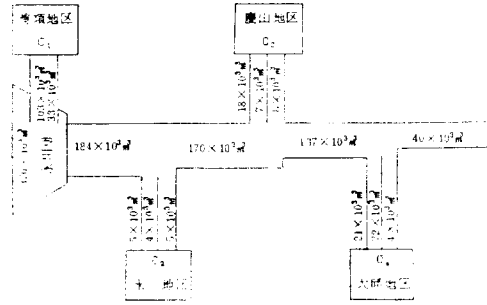


그림-7. 用途別 물配分圖

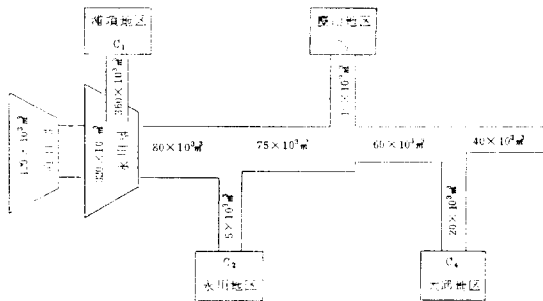


그림-6. 道日댐을 考慮한 地區別 물配分圖

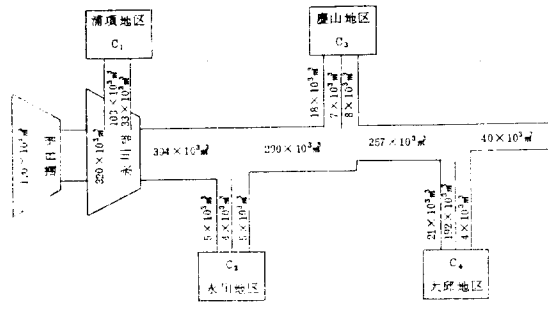


그림-8. 道日댐을 考慮한 用途別 물配分圖

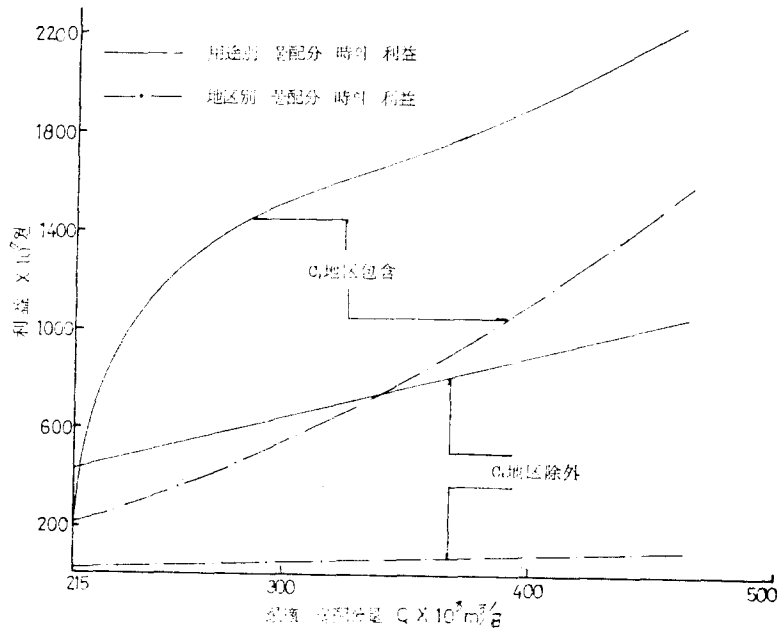


그림-9. 물配分時의 利益

4. 結 論

1) 地區別 물配分에서 C_1 地區(浦項)의 用水를 制限 없이 配分할 時 240 units($1 \text{ unit} = 10^8 \text{ m}^3/\text{日}$)까지는 永川댐의 可用水資源量만으로 供給이 可能하나 그 以上이 될 境遇에는 永川댐만의 可用水資源量만으로는 不足하므로 代替水資源을 開發해야 됨을 알 수 있었다.

2) 물配分에 있어서 用途別로 配分할 때의 利益이 地區別로 配分할 때의 利益보다 많이 나타남을 알 수 있었다.

3) 用途別로 물을 配分했을 때의 利益에서 可用水資源量이 217 units 以下일 때는 C_1 地區의 用水를 除外시킨 利益이 크다. 즉, 可用水資源量의 217 units 까지는 C_1 地區의 用水를 制限시키는 件이 利益이 크다는 점을 알 수 있었다.

4) C_1 地區의 用水를 制限하지 않고 地區別로 配分할 時 永川댐만의 可用水資源量으로는 C_1 地區에 240 units, 下流地區에 80 units 로 配分되었고, 永川댐 上流 道日댐을 考慮할 境遇 C_1 地區에 360 units, 下流地區에 80 units 로 配分되었다.

5) C_1 地區의 用水를 制限하지 않고 用途別로 配分할 時 永川댐만의 可用水資源量으로는 C_1 地區의 工業用

水(x_1), 生活用水(x_2)는 각각 103 units, 33 units 로 配分되고 下流地區에 184 units 로 配分되었다. 道日댐을 考慮할 境遇 C_1 地區의 工業用水(x_1), 生活用水(x_2)는 各各 103 units, 33 units 로 配分되고 下流地區에 340 units 로 配分되었다.

6) 따라서 用途別로 配分하므로써 琴湖江 下流地域에 더욱 많은 물을 配分할 수 있음을 발견할 수 있다.

參 考 文 獻

- 1) Bellman, R. and R. Kalaba; Dynamic Programming and Modern Control Theory Academic Press, p. 57~72, 1965.
- 2) Hastings, N.A.T.; Dynamic Programming(with management application), Crane, Russak & Company, p. 59~81, 1973.
- 3) Hiller and Lieberman; Introduction to Operation Research Holden-day Inc. p. 248~279, 1974.
- 4) Bellman, R.; Dynamic Programming, Princeton University Press. 1957.
- 5) Bell man, R.; Adaptive Control Process, Princeton University Press 1961.
- 6) Bell man, R. and S. Dreyfus; Applied Dynamic

- Programming, Princeton University Press. 1962.
- 7) Buras, N.; Dynamic Programming in Water Resources Development, Advance in Hydroscience. Vol. 5, p. 367~409, 1974.
 - 8) Butcher, W.S., Y.Y., Haimes and W.A. Hall; Dynamic Programming for the Optimal Sequencing of Water Supply Project, Water Resources Research Vol. 5, No. 6, December 1969.
 - 9) Haimes, Y.Y.; Hierarchical Analysis of Water Research System Modeling and Optimization of Large-Scale System, McGRAW-Hill Co. p. 34~48.
 - 10) Heidari, M., V.T. Chow, P.V. Kokotovic and D.D. Meredith; Discrete Differential Dynamic Programming Approach to Water Resources Systems Optimization; Water resources research Vol. 7, No. 2, April 1971.
 - 11) Larson, R.E.; State Increment Dynamic Programming, American Elsevier, New York 1968. American Elsevier, New York 1967.
 - 12) Larson, R.E.; Computational Aspect of Dynamic Programming, 1967. IEEE Int. Con. Rec. Part 3, March 1967.
 - 13) Larson, R.E.; A Survey of Dynamic Programming Computational Procedures, IEEE Trans. AC-12, No. 6, 767~774.
 - 14) Keckler, W.G.; Optimization about a Single Trajectory by Means of Dynamic Programming, Presented at SIAM 2nd, Int. Computing method in Optimization Problems, San Remo, Italy, September 1968.
 - 15) Larson, R.E. and W.G. Keckler; Application of Dynamic Programming to the Control of Water Resources Systems, Automatic Vol. 5, p. 15~26. Pergamon Press, 1969.
 - 16) 李舜鐸·張相根; 動的計劃法에 의한 用水供給施設의 最適化, 韓國水文學會誌, 第14卷 第2號, 1981.
 - 17) 李舜鐸; 水資源開發 및 用水供給시스템의 最適化, 環境問題 國際심포지움 發表論文, 1982.
 - 18) 慶尙北道 行政資料; 市·郡別 住民總生産 및 1人常 生産所得, 1980.
 - 19) 大邱地方國土管理廳; 琴湖江本流取水場現況, 1980.