

# 灌漑用水路에서의 水面曲線 計算

## Water Surface Profile Computations at Irrigation Channel Networks

金 顯 峻\* · 朴 承 禹\*  
Kim, Hyeon Jun · Park, Seung Woo

### Summary

A water surface profile computation model using a standard step procedure was developed for gradually varied flow at an irrigation channel network. Flow characteristics at Banweol district near Suweon were field monitored during irrigation period of 1987. The model was applied to the main system at the district and the simulation results were compared to the field data.

The results are summarized as follows :

1. The simulated water surface profiles from the model were in good agreement with the measured water surface profiles at different flow rates.
2. The model applicability for defining a stage-discharge relationship at a channel reach was demonstrated with reasonable accuracy when water stage and friction factor were given.
3. The roughness coefficient was found to be a major factor significantly affecting computed water surface profile among a few physical input parameters for the model.

### I. 緒 論

貯水池, 伏 또는 揚水場 等の 用水源으로부터 農耕地까지 導水하는 施設을 農業用水路組織이라 한다. 用水路組織은 用水幹線, 支線, 支渠로서 區分되며, 또한 導水を 원활히 하도록 하거나 分水等을 目的으로 設置되는 潛管, 架樋, 落差工과 制水門 等の 水利構造物로 構成된다<sup>2), 3), 4), 5)</sup>.

用水路組織에서 흐름의 特性은 用水源으로부터의 流入量과 水路區間에서 各 筆地로 分配되는

分水量 等に 따른 流量變化나 水路의 斷面, 바닥 傾斜 및 水利構造物 等の 영향에 따라 變化한다.

또한 同一한 水路區間에서 流量에 대한 導水特性이 季節에 따라 變化하며, 이와 같은 흐름의 特性에 관한 精確한 理解는 用水組織의 效率的인 물管理에 직접적인 도움이 될 수 있을 것이다<sup>5)</sup>.

一定 流量을 通水하고 있는 경우 用水路組織에서 흐름은 一般적으로 漸進變化流로서 定義할 수 있다. 그러나 用水路의 斷面幾何要素는 보통 한 區間에서 거의 一定하므로 等流假定을 適用하

\* 서울大學校 農科大學

는 경우가 있으나, 實際로 水路의 흐름은 水路 바닥傾斜의 變化 및 水利構造物 等에 따라 영향을 받게 되며 漸進變化流가 보통이다. 水路의 흐름 解析에서 等流 흐름의 假定을 適用하는 것은 지나치게 단순화하는 것으로 實際 흐름과 差異가 있게 된다. 따라서 用水組織에서의 흐름은 漸進變化流의 解析이 要請된다.

漸進變化流의 解析 方法은 이미 널리 알려져 있다. 最初의 漸進變化流의 解析은 Belanger(1828)에 의하여 구해졌으며, Dupuit(1848), Bresse(1960), Grashof(1875), Ruhlmann(1880), Schaffernak(1914), Kozeny(1928), Schoklish(1930) 등은 等斷面의 넓은 矩形水路에서, Bakhmeteff(1912), Mononobe(1938), Lee(1947), Von Seggern(1950), Chow(1955) 등은 모든 斷面에서 直接積分法(method of direct integration)을 사용하여 水面曲線을 計算하였다. 또한 逐次計算法(step method)을 이용하여 直接積分法보다 빠르고 쉽게 計算할 수 있게 되었고, 等斷面 및 自然河川의 不規則한 斷面에서도 解析이 가능하게 되었다(7, 8, 9).

漸進變化流의 解析을 위한 여러가지 電算模型들이 應用되었는데, 대표적 例에는 美國 土壤保全局(Soil Conservation Service)의 WSP-2模型, 地質調查局(Geological Survey)의 E-431模型과 工兵團(Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center)의 HEC-2模型 등이 있다(8).

흐름이 分支되는 경우도 Homma(1952)와 Wylie(1972)에 의하여 計算되었다.

國內에서는 권(1983)이 傾斜形 落差工의 水理設計에 逐次計算法을 利用하여 水面曲線을 計算한 바가 있다(1).

最近의 研究로는 Molinas(1985)가 跳水를 포함한 水面曲線을 計算하였고(11), Greg Barden (1985)은 CADD(computer-aided design and drafting)를 利用하여 資料를 入力시킴으로써 시간과 경비를 절감하는 方法을 제시하였다. 또한 Chaudry(1985)는 水路組織에서 漸進變化流를 解析하였으며(6) Laurenson(1986)은 摩擦傾斜의 計算方法에 따른 水面曲線의 變化를 比較하였다(10).

本 研究에서는 灌漑用水路에서의 水面曲線, 粗度係數 및 水位-流量關係를 計算할 수 있는 電算 프로그램을 開發하고 灌漑用水路에의 應用性을 評價하며 主要媒介變數들의 水面曲線에 미치

는 영향을 定量的으로 分析하여 그 利用性을 檢討하는데 目的이 있다.

## II. 模型의 構成

### 1. 基本方程式

#### 가. 基本假定

漸進變化流(gradually varied flow) 혹은 漸變流는 空間的으로 水深等의 흐름 特性이 變化하는 定常流로서 흐름의 變化가 漸進的인 狀態를 말한다. 즉, 一定 流量의 흐름이 相當한 區間에 걸쳐서 그 水理의 特性이 變化하는 경우로서 斷面의 幾何的 特性이 거의 變化하지 않는 긴 水路等의 흐름이다.

灌漑用水路에서의 흐름은 水路斷面과 바닥傾斜의 變化와 水路區間에 設置된 水利構造物의 영향, 分水로 인한 流量의 變化 등으로 대부분 漸進變化流의 特徵을 보인다.

漸進變化流의 解析에는 다음과 같은 假定이 必要하다.

- ① 흐름의 한 斷面에서의 損失水頭는 定常-等流(steady-uniform flow)의 경우처럼 Darcy-Weisbach 公式으로 표시될 수 있다.
- ② 水路의 바닥傾斜( $\theta$ )가 매우 작아  $\sin\theta \approx \tan\theta$  이며  $\cos\theta \approx 1$  이 성립한다.
- ③ 水路는 等斷面이다.
- ④ 흐름의 流速分布는 等分布이며 에너지 및 모멘텀補正係數는 임의의 區間內에서는 一定하다.
- ⑤ 通水能(K)과 斷面係數(Z)는 흐름의 水深의 指數函數이다.
- ⑥ 水路의 粗度係數(n)는 水深에 獨立的이며 고려되는 區間에서는 一定하다.

#### 나. 漸進變化流 方程式

Fig. 1과 같이 바닥傾斜가  $\theta$ 인 水路의 單位 길이(dx)에서의 漸進變化流에서 임의의 斷面に 있어서 基準點으로부터의 全水頭는 다음과 같다.(7)

$$H = z + d \cos\theta + \alpha \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots(1)$$

여기서 H는 全水頭이며, z는 位置水頭, d는 흐름의 水深,  $\theta$ 는 바닥傾斜,  $\alpha$ 는 에너지補正係數이고 v는 平均流速이다.

水路바닥을 x軸으로 하고 式(1)을 x에 대하여 微分하면 다음과 같다.

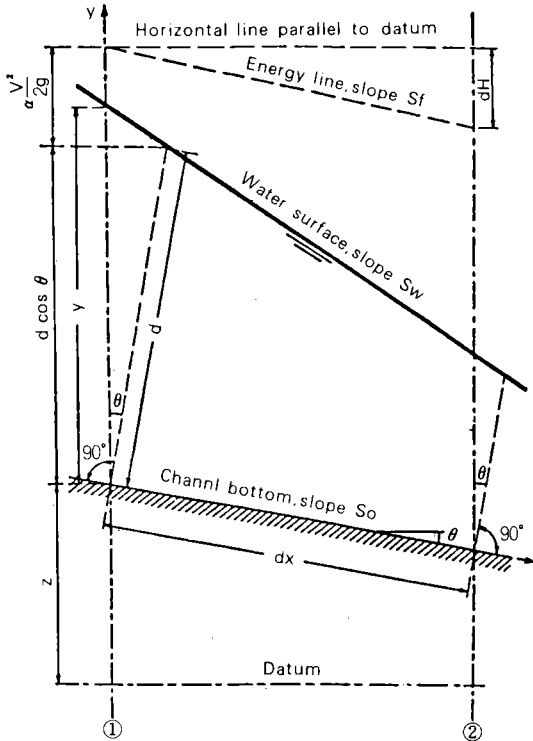


Fig. 1. Derivation of the gradually varied flow equation.

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \cos \theta \frac{dd}{dx} + \alpha \frac{d}{dx} \left( \frac{v^2}{2g} \right) \dots \dots \dots (2)$$

여기서  $dH/dx$ 는水路 바닥에 대한 에너지線の傾斜이고,  $dz/dx$ 는水路의 바닥傾斜이며 이들은各各 흐름의方向으로 하강하면 (-)이고, 상승하면 (+)이다.

式(2)에서  $dH/dx = -S_r$ ,  $dz/dx = S_0$ 이며  $\theta$ 가 매우 작다고 하면  $\cos \theta \approx 1$ ,  $d \approx y$ ,  $dd/dx \approx dy/dx$ 이다. 따라서式(2)를  $dy/dx$ 에 대해整理하면 다음과 같다.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_r}{1 + \alpha \frac{d}{dy} \left( \frac{v^2}{2g} \right)} \dots \dots \dots (3)$$

式(3)은漸進變化流의基本方程式으로  $S_r$ 는摩擦傾斜로서等流와同一하다고 한다면Manning의平均流速公式으로부터 구할 수 있다.

$$S_r = n^2 v^2 / R^{4/3} = Q^2 / K^2 \dots \dots \dots (4)$$

여기서  $R$ 는動水半徑( $R = A/P$ )이다.

## 2. 模型의 構成

漸進變化流의解析方法에는圖式積分法(graphical integration method),直接積分法(direct integration method),直接逐次計算法(direct step method),標準逐次計算法(standard step method)과圖式計算法等이 있다<sup>7),8),9)</sup>.

標準逐次法은距離의變化에따른水深의變化를구하는方法으로서,水路를微小區間으로나누고區間的兩斷面에서의全水頭差가두斷面の損失水頭와同一할때까지反復計算하여水面曲線을결정하는방법이다. 또한直接逐次計算法은水深의變化에따른距離의變化를구하는方法으로서標準逐次計算法과 유사한結果를얻는것으로알려지고 있다<sup>7)</sup>.

그런데灌漑用水路에서의水面曲線計算에서는水路傾斜 및水利構造物 등의 영향을 고려할 수 있도록 하려면 임의의位置에서의水面計算이필요하다. 이와 같은 목적에서標準逐次計算法이적절한것으로思料되었으며, 실제로 이 방법은 HEC-2 模型 등의 여러 模型에서 적용하는 등 실용성이 높은 것으로 생각되어本模型에서 적용하도록 하였다.

本模型에서標準逐次計算法은水路의斷面,流量 및粗度係數 등을 이용하여水面傾斜를定義하는 데 이용되었다. 그런데水面傾斜가 주어지고流量 또는粗度係數가各各 주어진 경우는粗度係數와流量을算定할 수 있다. 따라서水路의 한區間에서水面傾斜와粗度係數를알면水位-流量關係를計算할 수 있으며,水面傾斜와流量을알면 그區間에서의粗度係數를推定할 수 있다.

### 가. 計算內容

等流水深은時·空間的으로 흐름의水理의特性이變하지 않을 때의水深이며,水路바닥으로부터 일정한水深을 유지하게 된다.本研究에서는式(4)로부터 주어진流量에 대한等流水深을計算하였다.

限界水深은比에너지(specific energy)가最少일 때의水深이며, 다음式을 만족하는 값을 구하였다.

$$\frac{dE}{dy} = -\frac{\alpha Q^2 T}{g A^3} + 1 = 0 \dots \dots \dots (5)$$

나. 計算過程

本 模型의 入力資料는 斷面資料와 水理資料 및 水路區間資料로 大別할 수 있으며 斷面資料는 斷面幅과 斜面傾斜이고, 水理資料는 流量, 水深, 粗度係數 및 에너지補正係數이다. 水路區間資料는 區間의 길이, 計算距離間隔과 水路의 바닥傾斜, 始點의 地盤高, 水利構造物의 諸元 等이다.

計算過程을 要約하면 다음과 같다.

- ① 資料를 入力하고
- ② 計算內容(水面曲線, 流量, 粗度係數)을 選擇하며
- ③ 주어진 條件에서의 等流水深, 限界水深, Froude數, 限界傾斜을 計算하고
- ④ 水利構造物에서의 境界條件(水深)을 計算한다.
- ⑤ 計算의 初期條件을 設定한 다음
- ⑥ 水面曲線을 計算하고
- ⑦ 許容誤差(0.1mm)보다 작을 때까지 ⑤, ⑥을 反復한다.
- ⑧ 流量 및 粗度係數를 計算할 때는 주어진 水位와 比較하여 許容誤差보다 크면 ③으로 反復하여 다른 條件에서 다시 計算한다.

Ⅲ. 模型의 適用

1. 對象地區의 調査

本 電算模型의 適用地域은 京畿道 華城郡 半月貯水池를 主水源으로 하는 半月用水幹線의 일부 區間에서 實施하였다. 調査對象區間의 選定은 1985~87年동안 貯水池의 물管理 現況 調査가 施行되고 있어 基本的인 資料를 구하기가 容易할 뿐더러, 水原으로부터 가까이 位置하여 資料의 蒐集이 편리하고, 土工水路와 콘크리트 라이닝水路 區間이 있어서 水路의 築造材料에 따른 影響을 파악할 수 있다는 점이 고려되었다.

調査對象區間은 半月用水幹線 總延長 6.675km 中 貯水池로부터 2.3km 地點까지를 選定하였으며 Fig. 3은 調査對象地區의 개략적인 모습이다.

對象區間中 貯水池에서 0.8km까지는 底幅이 2.0m인 梯形 土工水路이고 나머지 區間은 底幅이 1.2m인 콘크리트 라이닝 水路이었다. 또한 부족한 灌漑用水를 충족시키기 위하여 河川에 泔가 1個所 있었으며 地形의 變化에 따라 落差工 5個所, 潛管 2個所 그리고 暗渠 1個所가 있었다. 또한 各 筆地에 灌漑用水를 供給하기 위한 分水管은

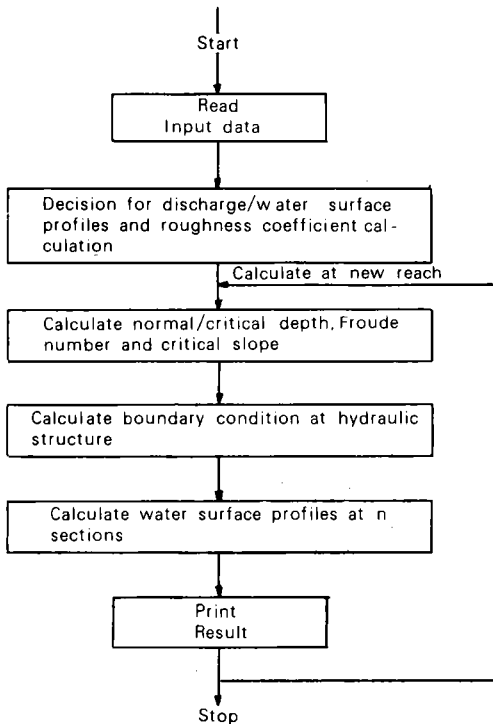


Fig. 2. Flow chart of WASP model.

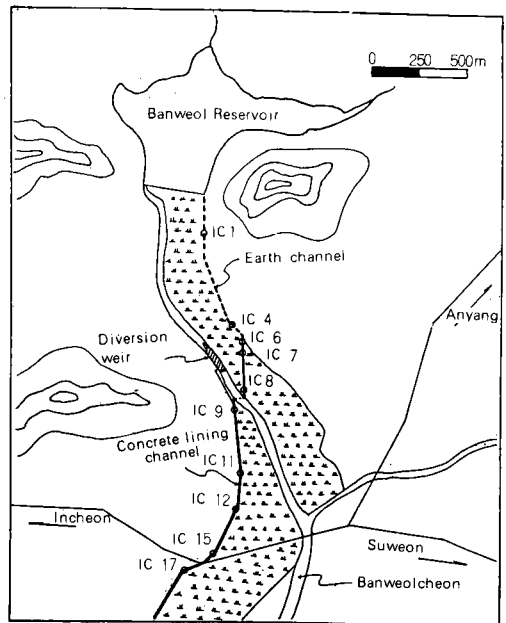


Fig. 3. The map of studied area and irrigation system layout.

14個소가 있었고 水路內的 잉여수를 배제하기 위한放水門이 2個소가 있었다.

用水幹線의 幾何的인 特性和 水路傾斜 및 各種 水利構造物 等的 調査를 위하여 水路縱橫斷測量을 實施하였으며, 用水幹線의 水面曲線 計算을 위하여 用水路의 몇 地點에서 水位 및 流速 測定을 實施하였다.

水位 測定은 灌溉 期間에 걸쳐서 1日 1回 하였으며, 測定 地點은 ①用水路의 流量 變化가 豫想되는 곳 ②落差工에 의해 水理特性이 變하는 곳 ③水路 築造 材料에 따른 粗度係數의 變化가 豫想되는 곳 等を 基準으로 選定하였다. 그리고 水位 測定 方法은 土工水路에서는 水路의 中央部에 簡易 水位標를 設置하여 水深을 測定하고 零點標高를 더하여 水位를 구하였으며 콘크리트 라이닝水路에서는 水路斜面的 基準點에서 水面까지의 斜面距離를 測定하고 斜面的 傾斜度를 고려하여 水位를 구한 값과 水路 中央에서 直徑 5cm의 아크릴圓管을 利用하여 水深을 測定한 값을 平均하여 사용하였다. 特히 模擬發生 計算의 信賴度를 높이고자 直線으로 뻗은 콘크리트 라이닝 水路 區間(縱斷測量에서 No.17+47~No.22+37)에 每 10m마다 簡易 水位標를 設置하여 實測한 水位와 模擬發生한 水位를 比較하도록 하였다.

水位 測定 地點의 流量은 測點에서 流速計를 使用하여 그 平均流速을 測定한 다음 斷面積을 곱하여 구하였으며 灌溉期間 中 水路의 粗度係數 變化和 各 地點에서의 水位-流量曲線을 구하기 위해 약한 달 간격으로 流速 測定을 實施하였다. 粗度係數는 流速 測定 結果와 流速 測定時 實測한 水面傾斜를 利用하여 Manning 公式으로 부터



Fig. 4. A view of measuring flow velocity and temporary staff gauge at earth channel.

구하였다. Fig. 4는 流速 測定 모습과 簡易 水位標의 全景이다.

## 2. 水面曲線計算

研究對象地域인 半月用水幹線의 2.3km 區間을 落差工과 같이 水理現象이 變함으로 因하여 計算의 境界條件이 될 수 있는 水利構造物을 基準으로 나누고, 分水管이 있는 곳과 水路의 바닥傾斜가 急變하여 水理現象의 變化가 豫想되는 곳을 小區間으로 나누어 總 10個의 區間에 19個의 小區間을 두고 있다.

Fig. 5는 檢證區間(No. 17+47~No. 22+37)에서 大流量과 小流量에서의 實測 水位와 模擬發生 水位를 比較한 것으로 7月 2日의 경우는 流量이  $0.126\text{m}^3/\text{s}$ 로서 測定 水位와 模擬發生 水位가 잘 一致하고 있는 것을 볼 수 있으며 8月 14日의 경우는 流量이  $0.535\text{m}^3/\text{s}$ 로서 比較적 잘 一致하고 있으나 大流量에서 水流의 水面波動이 크게 일어나고 落差工에서의 水理現象 變化가 크게 일어나는 原因으로 약간의 差異가 있었다.

Table-1은 各 計算 區間의 主要 水位 測定 地點에서 實測 水位와 模擬發生 水位를 比較한 것으로 平均 2cm 정도의 差異를 보이고 있으며, 檢證區間인 IC7, IC8에서는 약 1cm以內的 差異를 보이고 있다.

## 3. 流量計算

上流側의 實測 水位와 그 區間의 粗度係數가 주어진 경우 流量計算이 可能하다. 計算은 처음에 임의의 流量을 假定하여 주어진 條件에서 水

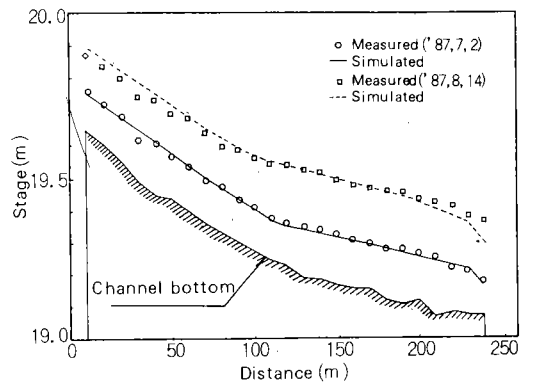


Fig. 5. Comparison between simulated and measured watersurface profile.

Table-1. Comparison between simulated and measured water stages at different station. unit : m

Date Desc. Station	1987. 7. 2			1987. 8. 14		
	Measured	Simulated	Difference	Measured	Simulated	Difference
IC 1	25.765	25.744	0.021	25.864	25.819	0.045
IC 4	22.492	22.470	0.022	22.621	22.679	-0.058
IC 6	20.734	20.771	-0.037	20.940	20.910	0.030
IC 7	19.740	19.735	0.005	19.865	19.881	-0.016
IC 8	19.255	19.252	0.003	19.429	19.420	0.009
IC 9	18.073	18.043	0.030	18.270	18.239	0.031
IC11	17.662	17.666	-0.004	17.834	17.947	-0.113
IC12	17.480	17.470	0.010	17.758	17.748	0.010
IC 15	17.341	17.111	0.230	17.362	17.360	0.002
IC 17	15.596	17.574	0.022	15.757	15.742	0.015

IC(irrigation channel) : 水位測定地點

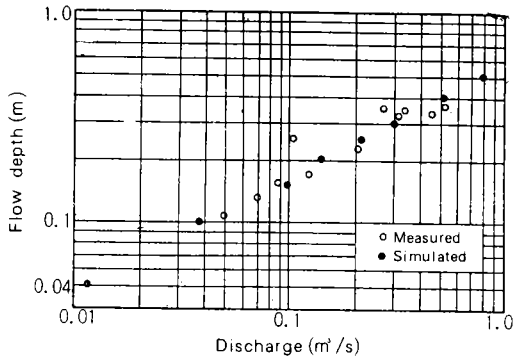


Fig. 6. Comparison between simulated and measured discharge.

面曲線을 計算하고 上流의 實測 水位와 模擬發生 水位의 差가 무시될 정도가 될 때까지 反復計算 한다.

Fig. 6 은 No. 17+47~No. 20+17 區間에서 測定한 水位-流量과 模擬發生한 水位-流量關係를 比較한 것이다. 模擬發生 流量과 實測 流量은 잘 一致되었으며 高水位의 몇 測點에서 差異가 있는 것은 流速 測定 및 水位 測定에서 發生하는 誤差에 起因한다고 생각된다.

#### 4. 模型의 銳敏度分析

本 電算模型의 主要 媒介變數들이 模擬發生 結果에 미치는 影響을 分析하기 위하여 摩擦傾斜의 計算方法 및 粗度係數, 에너지補正係數와 計算距離間隔 등을 一定한 範圍만큼씩 變化시켜 模擬發生된 結果를 比較하였다. 이와같은 方法을 模型

의 銳敏度分析이라고 하며, 本 研究에서는 水面曲線의 計算結果를 比較 分析하도록 하였다.

#### 가. 摩擦傾斜

水路의 兩斷面에서 平均摩擦傾斜를 구하는 式은 算術平均  $(\bar{S}_r = \frac{S_{r1} + S_{r2}}{2})$ , 幾何平均  $(\bar{S}_r = \sqrt{S_{r1} \cdot S_{r2}})$ , 調和平均  $(\bar{S}_r = \frac{2S_{r1} \cdot S_{r2}}{S_{r1} + S_{r2}})$ , 및

流量과 通水能으로 구하는 方法  $(\bar{S}_r = (\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2})^2)$  등이 있으며, Reed와 Wolfkill은 各 水面形에 따라 摩擦傾斜를 구하는 方法을 區分하였고 HEC-2 模型에서도 水面形에 따른 方法을 사용하였다<sup>8),10)</sup>.

M1 水面形과 M2 水面形에 대하여 네 가지의 摩擦傾斜 計算方法을 適用하여 本 結果, 水面曲線의 計算에 있어서 2mm 以內의 差異를 보였다.

#### 나. 粗度係數

粗度係數의 變化에 따른 模型의 舉動을 分析하기 위하여 No. 17+47~No. 22+37 區間에서 流量 0.535m<sup>3</sup>/s, 에너지補正係數 1.15, 수로 바닥傾斜 0.0023일 때 粗度係數를 0.015부터 0.005씩 增加하여 0.040까지 變化시키고 模擬發生되는 水深을 計算基點으로부터 10m, 50m, 200m 떨어진 地點에서 比較하였다.

Fig. 7 은 模擬發生 結果이며 粗度係數의 增加에 따라 水深도 增加함을 알 수 있으며 計算基點에서 멀수록 그 變化幅도 더 크게 나타났다.

이 외에도 에너지補正係數와 計算距離 間隔이 水面曲線의 計算에 影響을 미치는 因子임을 알 수 있었다.

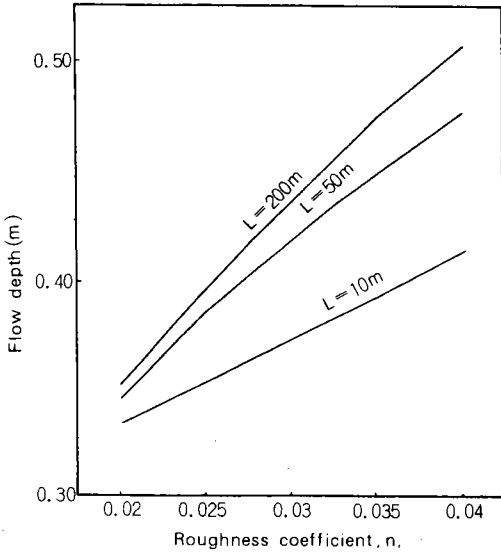


Fig. 7. Comparison of simulated water surface profiles at different Manning's roughness coefficient.

## VI. 要約 및 結論

灌漑用水路에서의 漸進變化流 解析을 위하여 電算 프로그램을 開發하고 半月用水幹線에서 그 適用性を 檢討하며 主要媒介變數에 대한 銳敏度 分析을 實施한 結果, 다음과 같은 結論을 내릴 수 있다.

1. 半月用水幹線의 一部 區間에 適用한 結果, 實測水位와 模擬發生水位는 거의 一致하였다.
2. 한 區間에서 上流側의 實測水位와 同區間의 粗度係數를 알면, 그 區間에서의 水位-流量 關係를 誘導할 수 있었다.
3. 水路의 粗度係數가 水面曲線 計算에 큰 影響을 미치며, 平均摩擦傾斜의 計算方法, 에너지 補正係數 및 計算距離間隔 등은 影響이 크게없어 거의 무시할 수 있었다.

## 參 考 文 獻

1. 權純國, "傾斜形 落差工의 水理設計", 韓國農工學會誌, 25(3), 1983, pp 87~pp 95
2. 農水産部, 農地改良事業 計劃設計基準, 水路工篇 1, 2, 1974
3. 農水産部, 農地改良事業 計劃設計基準, 水路工篇 1, 2, 1974 灌漑篇, 1983
4. 農水産部 農業振興公社, 農業用水開發 試驗研究 2, 3, 1983~1984
5. 農水産部 農業振興公社, 貯水池 水量管理研究 I, II, III, 1985~1987
6. Chaudhry, M. H. and Schute, A., "Computation of Gradually Varied Flows in Channel networks", Hydraulics and Hydrology in Small Computer Age, ASCE, 1985, pp 795-800
7. Chow, V. T., Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, 1959, pp 217-321
8. French, R. H. Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, 1985, pp 195-246
9. Henderson, F. M., Open channel Flow, Macmillan Company, New York, 1966, pp 126-161
10. Laurenson, H. R., "Friction Slope Averaging in Backwater Calculations", Journal of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 112, No. HY12, December, 1986. pp 1151-1163
11. Molinas, A. and Chih Ted Yang, "Generalized Water Surface Profile Computations", Journal of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 111, No. HY3, March, 1985, pp 381-391