

<論 文>

一定幅 急傾斜 開水路上을 流動하는 물의 깊이
變化에 관한 實驗的 研究

朴 伊 東*

(1985年 9月 16日 接受)

An Experimental Study on the Depth Variation of Water Flow
on Steep Open Channel with Constant Width

Ee-Tong Pak

Key Words: Uniform Flow(균일유동), Open Channel(개수로), Channel Slope Angle(수로경사각)
Depth of Flow(유동깊이), Curve Fitting(곡선확정)

Abstract

A study on film water flow on steep open channel has been seldom found up to date. Therefore, this paper dealt with the depth variation of film thickness of water (city supply normal water) flowing on steep open channel. For this purpose, Experimental apparatus (made of a normal glass with 160cm of length and 15 cm of width) was made and the depths of the water flowing on the channel were measured experimentally, changing the channel slope angle from 30 to 80 degree (5 steps) and the flow rate from 0.25 to 10CPM (11 steps).

The results obtained, some characteristics of the film flow on the channel are as follows.

- (1) When thin film water flowed on steep open channel, the depths of flow tended to increase after decreasing and was kept nearly constant in its downstream in case of laminar and transitional flow region.

The turning point of the depths of flow from decrease to increase tended to move downward with the increase of Reynolds number.

In turbulent flow region, the depths of flow showed reapid decrease in its upper stream, gradual decrease in its midstream and were kept nearly constant in its downstream.

- (2) While the differences between the depths of flow along the channel slope got small in its upper stream and got large in its downstream in case of laminar flow region, they got very large in its upper stream and were kept nearly constant in its downstream in case of transitional and turbulent flow region. And the more flow rate increases, the more the differences between the depths of flow along the channel slope got large in its upper stream.

*正會員, 成均館大學校 工科大學 機械工學科

기 호 설 명

- A : 유동 단면적(m^2)
- b : 직각 개수로의 폭(m)
- C : 유동저항 계수(Chezy's C)
- g : 중력가속도(m/sec^2)
- h : 유동 깊이(mm)
- i, j : 지수
- m : 질량 유동율(kg/sec)
- n : 조도계수(Manning's n)
- Q : 체적유동율(m^3/sec)
- q : 단위폭당 체적유동율($m^3/sec/m$)
- Re : Reynolds 수
- R_h : 수력반경(m)
- S : 수로경사
- V : 무한폭인 경우의 개수로상의 평균유속(m/sec)
- u : 유동속도 분포(m/sec)
- x, y, z : 직교좌표
- α : Curve fitting의 다항식 중 x^7 의 계수
- β : Curve fitting의 다항식 중 x^6 의 계수
- γ : Curve fitting의 다항식 중 x^5 의 계수
- ϵ : Curve fitting의 다항식 중 x^4 의 계수
- θ : 수평으로부터 개수로의 경사각도($^\circ$)
- ν : 동점성 계수(m^2/sec)
- ρ : 밀도(kg/m^3)

1. 序 論

開水路 水力學에 對한 研究는 主로 洪水, 灌溉 및 給水를 調節하기 爲해 要求되어 왔다. 그러나 開水路 水力學에 內在된 뚜렷이 定義되지 않은 여러 變數들과 그들의 相互 依存性을 밝히기 爲하여 理論解析과 實驗解析을 並行하여 왔고 그렇게 함으로서 層流와 亂流의 特性, 境界層 理論, 水路上의 速度分布와 平均速度, 流動抵抗에 關聯된 摩擦係數, 水路形狀에 따른 效果, 流量係數와 流動率, 水路傾斜도에 따른 流動特性, 流動의 安定性 等を 分析해 왔다. 그리고 이를 水路上의 流體 輸送, 流動輸郭 決定, 水路 設計와 水力 構造物 設計, 댐의 背水效果, 빗물의 流動, 河川의 合流等의 問題에 適用키 爲한 研究가 遂行되었으나 大部分이 緩傾

斜의 自然的인 흐름에 關聯된 것이었다.

그러나 最近, 化學工業에서 製糖過程中冷却器와 蒸發器에서의 膜流動等의 産業的 側面에 適用하기 爲해서 急傾斜 開水路上의 流動에 對한 研究가 必要하게 되었다.

開水路上의 流動에 對한 研究로서 일찌기 W.M. Owen⁽¹⁾은 矩形 水路上을 層流로 流動할 때 Navier-Stokes 方程式으로부터 流動速度와 流量을 理論的으로 誘導하였으며 L.G. Straub와 E. Silberman과 그리고 H.C. Nelson⁽²⁾等은 매끈한 開水路上을 層流로 流動할 때 Navier-Stokes 方程式을 풀어 形狀에 따른 速度分布를 求하였다. 또한 P.S. Chisholm과 G. Tsang⁽³⁾은 圓型管內를 充滿하여 uniform flow로 流動하는 簡單한 理論에 基礎를 두고 Manning 方程式의 成功的인 適用을 爲한 再檢討를 試圖했다. V.V. Jayaraman⁽⁴⁾은 管抵抗線圖를 開水路流動問題 解決에 利用하면 그릇된 結果가 導出되므로 用水路 流動을 管流動과 分離하여 取扱해야 함을 實驗을 通하여 指適했고 Ir. J. Berlamont⁽⁵⁾는 流量이 一定한 急傾斜 理論 이 適用되지 않음을 보였으며 O.N. Walkhlu⁽⁶⁾는 急傾斜의 얇은 膜流動問題 解決에 次元解析을 통해 導入된 無次元數가 重要함을 確認하였고 또한 S.S. Nabi, M. Janil과 S. Shah⁽⁷⁾는 均一流動을 考慮하여 境界層이 完全 確立되었을 때 速度分布의 安定樣相을 얻었으며 J.J. Sharp⁽⁸⁾는 水路가 大端히 넓다고 假定할 때 包含되는 誤差를 分析하여 幅對 깊이 比가 10보다 클 때 假定이 一般的으로 正當化됨을 보였고 Chezy나 Manning 方程式에 對한 修正解의 참값을 얻기 爲하여 近似的인 流動깊이 計算에 適用되는 修正係數를 提供했다. C.C. Song과 C.T. Yang⁽⁹⁾은 에너지 消費 最小率 理論 또는 最小 流動動力 理論을 二次流動이 없는 無限幅 開水路에 適用하여 層流 流動과 亂流流動 各各의 境遇에 對한 速度分布를 決定하였고 W.R.C. Myers⁽¹⁰⁾는 넓은 範圍의 Reynolds數와 35에서 1까지의 幅對 깊이 比에 對한 矩形 水路의 摩擦係數를 決定하여 이 摩擦係數가 管 流動에 使用되는 摩擦係數와는 다르다는 것을 보였으며 幅對 깊이 比가 摩擦係數에 미치는 影響을 調查하였다.

本 研究에서는 幅이 一定한 急傾斜 開水路上(0.15 m W×1.6mL)을 常溫의 물이 流動할 때 流動率과 水路 傾斜도에 따른 各位置에서의 流動깊이 變化를 實測을 通하여 밝히고 理論值와 比較하였다.

2. 關聯方程式과 適用

2.1 層流流動

一般的으로 水路가 無限幅이라는 假定과 自由表面을 갖는 uniform 層流流動인 ;境遇에서 流動깊이를 h , 水路 幅 方向을 x , 水路에 垂直方向을 y 그리고 流動方向을 z 軸으로 잡고 自由表面에서 原點을 取하면 다음과 같은 流動깊이를 求할 수 있다⁽¹¹⁾.

水路上的 任意點에서 速度分布는

$$u = \frac{g}{2\nu} (h^2 - y^2) \sin \theta \tag{1}$$

單位幅當 流動率은

$$q = \frac{gh^3}{3\nu} \sin \theta \tag{2}$$

流動깊이는

$$h = \left(\frac{3\nu m}{\rho gb \sin \theta} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

위의 式을 使用하여 流動깊이를 求하기 爲하여 實驗時 常溫의 물의 密度와 動粘性係數를 使用하였고 水路 幅 b 는 0.15 m 의 값을, 또 기울이는 水平에 對한 水路 傾斜角의 sine 값을 取하여 計算하였다.

2.2 亂流流動

開水路上에서의 流動을 定常 均一流動이라고 생각하면 開水學的 計算을 爲한 亂流 均一流動의 平均速度는 恒常 均一流動 法則에 依하여 $V = CR_h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$ 으로 부터 近似的으로 얻을 수 있다. 그리고 가장 잘 알려져 있고 또 많이 使用되는 式이 經驗을 통해 밝혀졌고 證明된 Chezy 와 Manning 式⁽¹¹⁾이 있다.

$$\text{Manning 方程式은 } V = \frac{0.82}{n} R_h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

$$\text{流動率은 } Q = A \cdot V = \frac{0.82}{n} A R_h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

$$\text{流動깊이는 } h = \left(\frac{n}{0.82}, \frac{m}{b\rho}, \frac{l}{S^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{8}} \tag{6}$$

위의 式을 使用하여 開水路上的 亂流流動에 對한 均一流動 깊이를 求하기 爲하여 密度는 實驗時 물의 溫度에 對한 對應값을 使用하였으며 質量 流動率은 實驗時 drainage technique 을 使用하여 補正한 값을 그리고 水路幅과 Manning 의 roughness coefficient 는 0.15 m 와 0.01⁽¹²⁾의 값을 또 기울이는 水平에 對한 水路 傾斜角을 sine 값을 取하여 計算하였다.

3. 實驗裝置와 節次

水路는 幅 15 cm, 길이 160 cm 의 유리板을 바닥으로 使用하였으며 Fig. 1 에 보인 것과 같이 製作, 設置하여 實驗하였다. 물의 流動깊이는 1/1000 mm scale 을 가진 digimatic depth micrometer 를 使用하여 測定하였다. 물의 流動率은 0.2~2.2 GPM 와 1~10 GPM 의 測定 範圍를 가진 2 個의 floating type 流動計를 實驗時 미리 補正하여 使用하였다.

實驗은 다음의 節次에 의거 遂行하였다.

(1) 給水桶 內部的 間막이 위로 微量의 물이 흘러 넘치면서 一定 水頭로 물을 水槽에 供給할 수 있게끔 流量計 뒤의 gate value 와 給水桶에 물을 供給하는 gate value 를 相互 調節하여 流量計가 指示하는 流動率이 測定하고자 하는 流動率에 一定할 때 두 gate value 를 固定시킨다.

(2) 그 狀態에서 水路 下端部の 角度調節裝置를 調節하여 測定코자 하는 水路 傾斜度에 固定시키는데 水平에 對해 30°, 40°, 50° 60°, 70°, 80°로 傾斜시키면서 實驗하였다.

(3) 流量率과 水路 傾斜度를 一定하게 維持시킨 狀態에서 水路 入口로부터의 거리가 5 cm, 15 cm, 35 cm, 65 cm, 95 cm, 125 cm, 145 cm, 155 cm 인 位置에 Adjuster 를 옮겨 가며 물의 流動깊이를 depth gage 로 測定하였다.

(4) 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 GPM 의 流動率에 對하여 위의 節次를 반복 수행하였다.

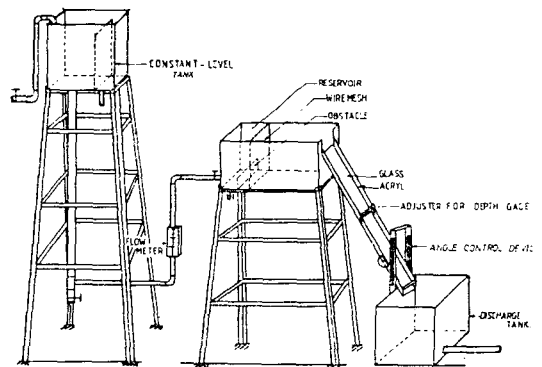


Fig. 1 Skeleton of experimental apparatus

4. 實驗結果 및 考察

開水路 流動에서 Reynolds 數는 $Re = \frac{VR_n}{\nu} = \frac{m}{\nu b \rho}$ 인데 여기서 ν 와 ρ 는 一定이므로 Re 는 質量 流動率에 따라서만 變化하였다. 그래서 本 實驗에서는 流量을 一定하게 維持시키면 Re 는 一定하게 維持되므로 流量을 바꾸어 Re 를 바꾸도록 하여 Re 에 따라 實驗結果를 整理하였다. 開水路 流動에서 Re 가 500 보다 작은 領域은 層流 流動 領域, 500 과 2,000 사이의 區間은 遷移 流動 領域, 2,000 보다 큰 區間은 亂流 流動 領域으로 定義된다. 물이 急傾斜 開水路 上을 流動할 때 Fig. 2, 3 및 4는 Re 가 각각 84, 180 및 413 인 層流 流動의 境遇를 나타낸 것이다. 또한 層流 流動에 適用되는 理

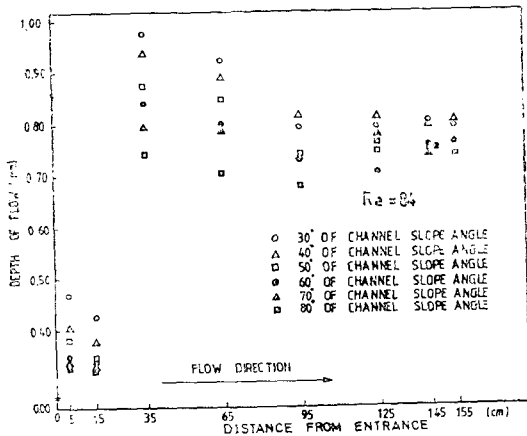


Fig. 2 Depth of flow on open channel with 0.014 kg/sec of flow rate

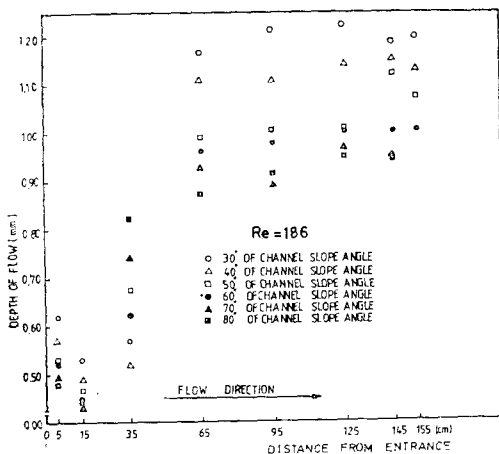


Fig. 3 Depth of flow on open channel with 0.031 kg/sec of flow rate

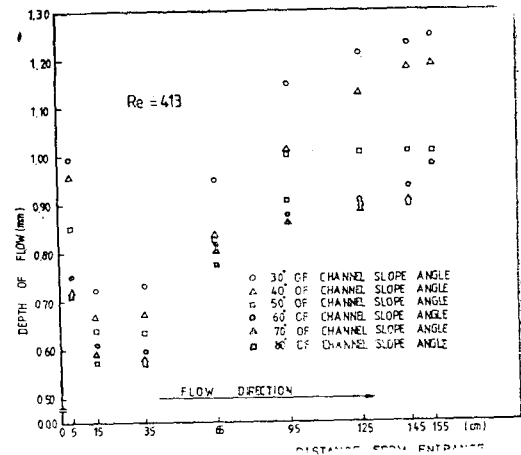


Fig. 4 Depth of flow on open channel with 0.069 kg/sec of flow rate

Table 1 Theoretical depth of flow on open channel in laminar flow

Flow-rate (kg/sec)	Reynolds No. (Re)	Channel-slope-angle (degree)	Depth of flow (mm)
0.014	84	30	0.3993
		40	0.3672
		50	0.3464
		60	0.3325
		70	0.3236
		80	0.3185
0.031	186	30	0.5205
		40	0.4787
		50	0.4515
		60	0.4334
		70	0.4217
		80	0.4152
0.069	413	30	0.6796
		40	0.6250
		50	0.5895
		60	0.5659
		70	0.5507
		80	0.5421

論式을 使用하여 求한 水路 傾斜度에 따른 理論 流動 깊이를 Table 1에 나타냈다. Fig. 2, 3 및 4를 살펴 보면 一般적으로 水路 上端에서는 流動깊이가 漸次 減少하다가 어느 位置를 지나서는 急激히 增加하여 下端部에는 流動깊이가 거의 一定하게 나타난다. Re 가 84 일 때 水路 傾斜度가 60°인 境遇 水路 上端部의 水路 入口로부터 15 cm 인 位置까지는 물의 流動깊이가 0.35

mm 까지 微量 減少하나 15 cm 와 35 cm 사이에서 0.35 mm 로 부터 0.85 mm 로 깊이가 急激히 增加하고 95 cm 以後의 位置에서 流動깊이는 0.7 mm 前後로 維持됐다. 그리고 理論 流動깊이는 0.33 mm 이고 實驗에서 얻은 最小 流動깊이는 0.35 mm 이므로 實驗에서 얻은 流動깊이가 水路 全區間에서 理論 流動 깊이보다 크다.

Re 가 186 일 때 60° 의 水路 傾斜度의 境遇, 水路 入口로 부터 15 cm 인 位置까지는 0.52 mm 에서 0.45 mm 로 0.07 mm 깊이가 減少하고 15 cm 와 65 cm 사이에서 0.5 mm 로 부터 0.96 mm 까지 깊이가 增加하여 65 cm 以後의 位置에서 거의 流動깊이가 1.0 mm 前後를 維持했다.

그리고 이때 理論 流動깊이가 0.43 mm 인 反面 實驗에서 얻은 最小 流動 깊이가 0.45 mm 이므로 實驗에서 얻은 流動 깊이가 水路 全區間에서 理論 流動 깊이 보다 크다. 또한 Re 가 413 인 60° 의 水路傾斜度의 경우, 水路 入口로 부터 35 cm 인 位置까지 0.75 mm 에서 0.6 mm 로 流動 깊이가 減少하고 35 cm 와 95 cm 사이에서 0.85 mm 까지 增加하여 95 cm 以後의 位置에서 流動 깊이가 거의 一定하게 維持된다. 이때 理論 流動 깊이는 0.57 mm 이고 實驗에서 얻은 最小值는 0.6 mm 이므로 實驗值가 水路 全 區間에서 理論值보다 크 다. 以上과 같은 結果로 부터 流量이 增加하면 流動 깊이가 減少하다가 增加하는 位置가 下流方向으로 漸次 移動하고 水路 上端部에서 水路上을 流動하면서 流動 깊이의 差가 커지고 또한 水路 上端部에서 水路 傾斜 度에 따른 流動 깊이의 差가 커지는 것으로 나타났다. 그리고 水路 全區間에서 實驗에서 얻은 流動 깊이가 理 論 流動 깊이 보다 크게 나타났다.

Fig. 5, 6, 7 및 8 은 Re 가 각각 579, 781, 1163 및 1544 인 遷移流動 領域에서의 流動 깊이이다. Re 가 579 인 60° 의 水路 傾斜度에서 流動 깊이는 水路 入口로 부터 35 cm 까지 1.0 mm 로부터 0.7 mm 로까지 減少하고 水路 入口로부터 35 cm 와 95 cm 사이에서는 1.0 mm 까지 增加하여 以後의 位置에서 거의 一定하게 流動 깊이가 維持된다. 그리고 Re 가 781, 1163 인 경우에도 위와 같은 경향을 보이나 流量이 增加할 수록 流動 깊이가 減少하다가 增加하는 位置가 下流 方向으로 移動하고 水路 上端部에서 水路上을 流動하면서 傾斜 度에 따른 流動 깊이의 差가 점점 더 커진다. 流量이 더욱 增加하여 Re 가 1544 인 60° 의 水路 傾斜度에서 水路 入口로부터 35 cm 까지 流動 깊이가 2.2 mm 로부터 1.1 mm 로 急激히 減少하고 水路 入口로부터 35 cm, 95 cm 사이에서 점차 減少하여 水路 入口로부터 95 cm

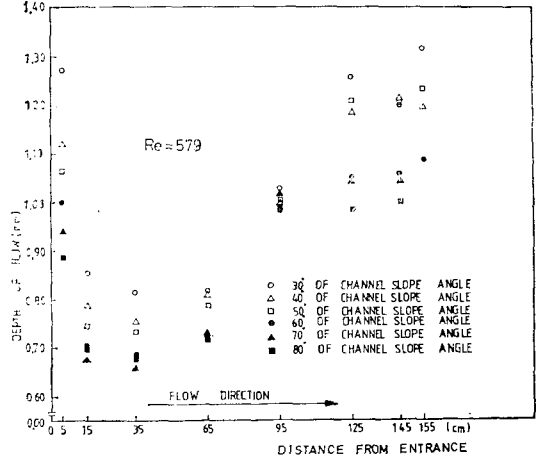


Fig. 5 Depth of flow on open channel with 0.094 kg/sec of flow rate

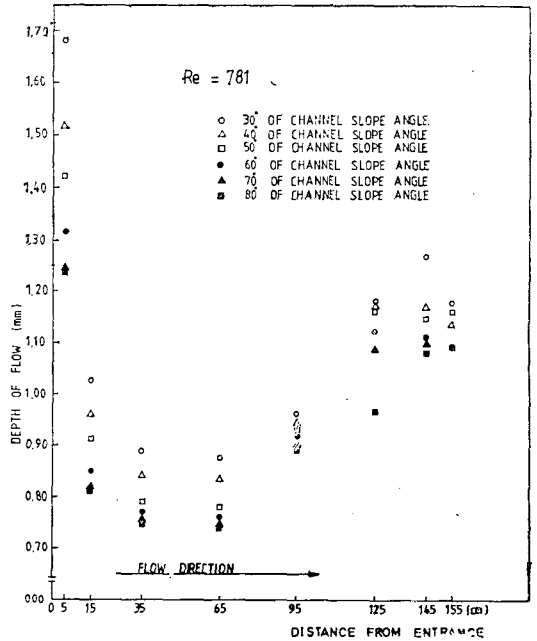


Fig. 6 Depth of flow on open channel with 0.127 kg/sec of flow rate

以後의 位置에서 조금 增加한다. 遷移流動 領域에서도 一般的으로 流動 깊이가 減少하다가 增加하는 傾向을 나타내는데 流量이 增加할수록 流動 깊이가 減少하다가 增加하는 位置가 下流方向으로 점점 移動하고 水路 下端部에서의 流動 깊이의 增加는 점차 작아진다. 또한 流量이 增加할수록 水路 上端部에서는 水路上을 流動하면서 流動 깊이가 더욱 急激하게 減少하고 또한 該處에서 水路 傾斜度에 따른 流動 깊이의 差가 더욱 커진다.

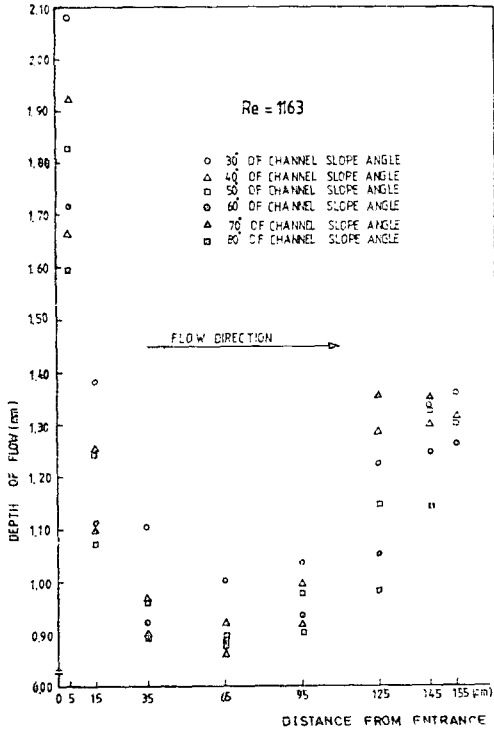


Fig. 7 Depth of flow on open channel with 0.189 kg/sec of flow rate

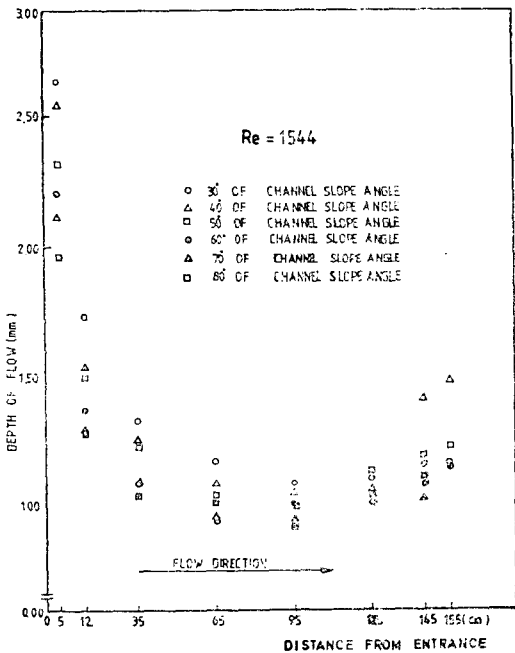


Fig. 8 Depth of flow on open channel with 0.252 kg/sec of flow rate

Fig. 9, 10 및 11은 Re 가 각각 2342, 3126 및 3802 인亂流流動領域에서實測한流動 깊이의變化를나

타낸 것이다. 또한 Table 2는 위와 같은 Re 에서 Manning 方程式을 사용하여 求한水路 傾斜度에 따른均一流動 깊이를 나타낸 것이다. Re 가 2342인 60° 水路 傾斜度에서流動 깊이는水路 入口로부터 5cm의位置에서 3.0mm이었던 것이水路 入口로부터 35cm되는 곳에서는 1.5mm로急激히減少하고水路 入口로부터 65cm되는位置以後에서는流動 깊이가 1.3mm로 거의一定하게維持된다. 그리고水路 入口로부터 15cm되는位置와 그以後의水路 全區間에서의流動 깊이는理論的인均一流動 깊이보다 작고流動 깊이가 거의一定하게維持되는下端部에서는 0.7mm에達한다. 60° 의水路 傾斜度에서 Re 가 3126인 경우水路 入口로부터 5cm되는位置에서流動 깊이가 3.8mm이었던 것이水路 入口로부터 35cm되는位置에서는 1.7mm로急激히減少하고水路 入口로부터 35cm와 95cm 사이에서漸次로減少하여下端部에서는流動 깊이가 1.2mm로 거의一定하게維持된다. 또한理論上的의均一流動 깊이가 2.45mm이므로水路 入口로부터 15cm位置以後는實驗에서測定한流動 깊이가理論的均一流動 깊이보다 작다. 그리고 Re 가 3802의 60° 水路 傾斜度에서流動 깊이는水路 入口로부터 5cm의位置에서 4.6mm이었던다가水路 入口로부터 35cm의位置에서 2.1mm로流量이적을때보다 더욱急激히減少하고水路 入口로부터 35cm以後의位置에서漸次로減少하다가水路 入口로부터 65cm以後의區間에서流動 깊이가 거의 1.5mm로一定하게維持된다. 이와 같이流量이 점점增加할수

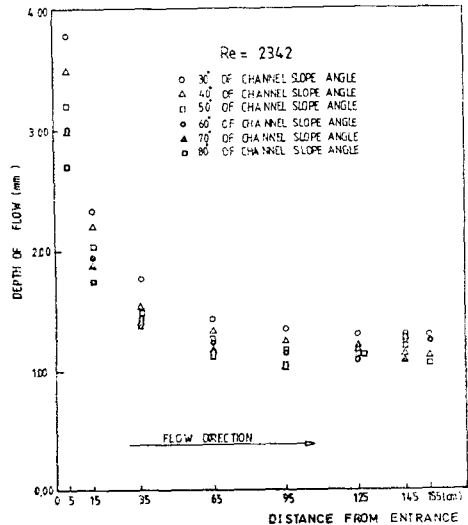


Fig. 9 Depth of flow on open channel with 0.382 kg/sec of flow rate

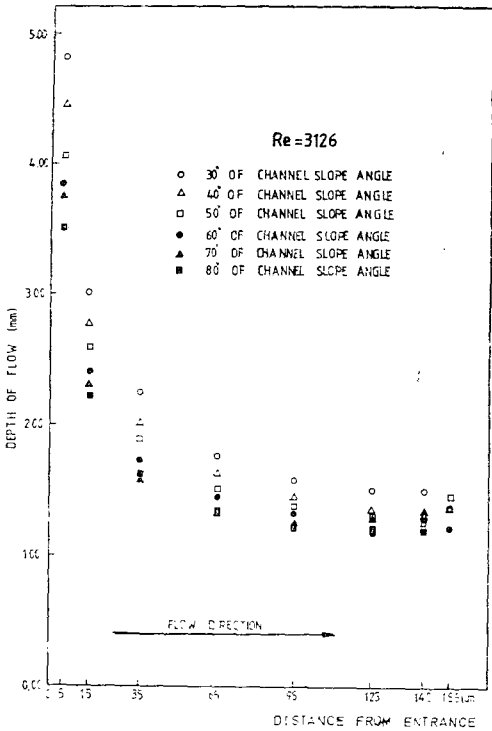


Fig. 10 Depth of flow on open channel with 0.509 kg/sec of flow rate

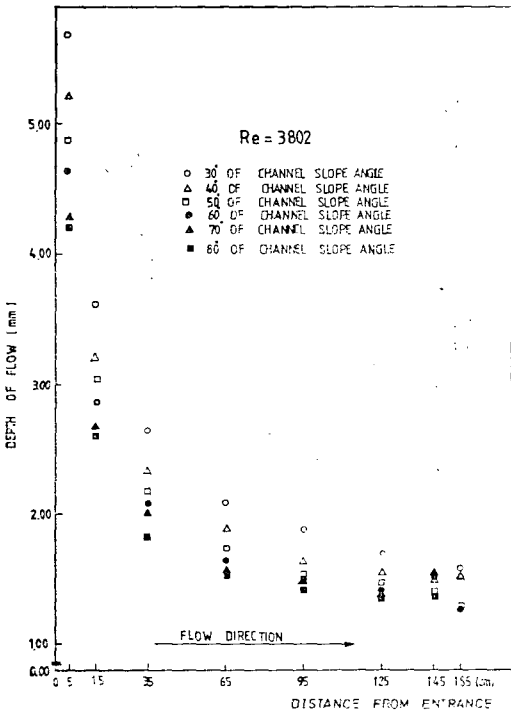


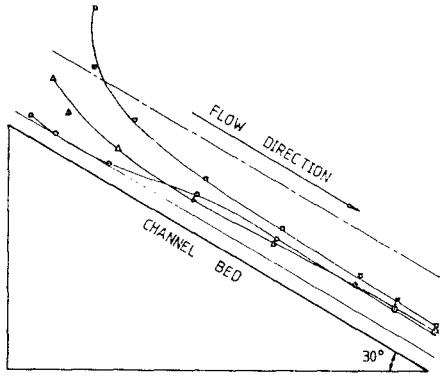
Fig. 11 Depth of flow on open channel with 0.619 kg/sec of flow rate

Table 2 Theoretical depth of flow on open channel in turbulent flow

Flow-rate (kg/sec)	Reynolds No. (Re)	Channel-Slope-angle (degree)	Depth of flow (mm)
0.382	2342	30	2.4319
		40	2.2554
		50	2.1398
		60	2.0624
		70	2.0125
		80	1.9844
0.509	3126	30	2.8914
		40	2.6815
		50	2.5441
		60	2.4521
		70	2.3928
		80	2.3594
0.619	3802	30	3.2515
		40	3.0154
		50	2.8908
		60	2.7575
		70	2.6907
		80	2.6532

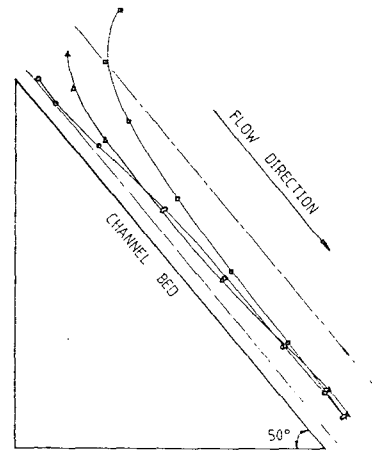
특 水路 上端部에서 흘러내려 오면서 더욱 急激하게 流動 깊이가 減少하고 또 水路 傾斜度에 따라 한 지점에서 流動 깊이의 差도 流動이 增加함에 따라 더욱 커지고 流動 깊이가 거의 一定하게 維持되는 位置에서는 實驗에서 實測하여 얻은 流動 깊이와 理論上的의 均一 流動 깊이의 差가 流量이 增加함에 따라 점점 더 커지는 것으로 나타났다.

Fig. 12에서 Fig. 17까지는 각각 30°에서 80°까지 (10°單位), 水路 傾斜度에 따른 流動 깊이의 畵를 圖示한 것인데 層流 流動의 경우는 Re가 186, 遷移 流動의 경우는 Re가 1163, 亂流 流動의 경우는 Re가 3126인 세 경우의 流動 特性을 代表的으로 選擇하여 理論的으로 求한 流動 깊이와 實驗에서 얻은 流動 깊이를 比較, 圖示한 것이다. Re가 86인 경우 水路 上端部에서 水路를 통해 流動하면서 流動 깊이가 조금 減少하다가 어느 位置를 지나 增加하여 水路 中端部에서는 流動 깊이가 거의 一定하게 維持되고 從來의 層流 流動 方程式에서 求한 流動 깊이와 比較하면 上端部에서는 實驗에서 얻은 流動 깊이가 理論 流動 깊이 보다 微量 크나 下端部에서는 實驗에서 얻은 流動 깊이가 훨씬 크다. Re가 1163인 경우 上端部에서는 流動 깊이가 急激히 減少하고 下端部에서는 流動 깊이가 거의 一定하게 維



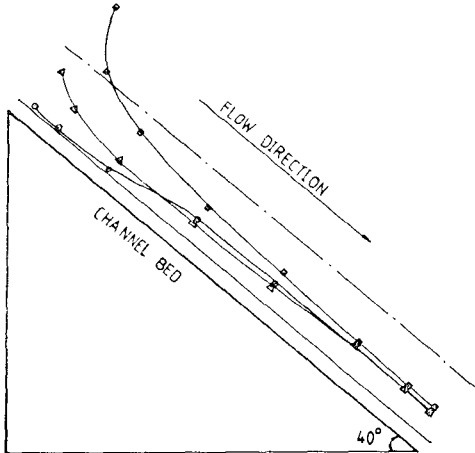
- : Experimental depth of flow(0.031 kg/sec)
- : Theoretical depth of flow(0.031 kg/sec)
- △ : Experimental depth of flow(0.189 kg/sec)
- : Experimental depth of flow(0.509 kg/sec)
- - - : Theoretical depth of flow(0.509 kg/sec)

Fig. 12 Comparison of experimental depth of flow with theoretical depth of flow at 30° of channel slope angle



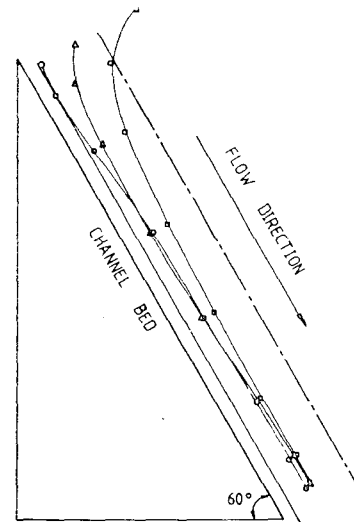
- : Experimental depth of flow(0.031 kg/sec)
- : Theoretical depth of flow(0.031 kg/sec)
- △ : Experimental depth of flow(0.189 kg/sec)
- : Experimental depth of flow(0.509 kg/sec)
- - - : Theoretical depth of flow(0.509 kg/sec)

Fig. 14 Comparison of experimental depth of flow with theoretical depth of flow at 50° of channel slope angle



- : Experimental depth of flow(0.031 kg/sec)
- : Theoretical depth of flow(0.031 kg/sec)
- △ : Experimental depth of flow(0.189 kg/sec)
- : Experimental depth of flow(0.509 kg/sec)
- - - : Theoretical depth of flow(0.509 kg/sec)

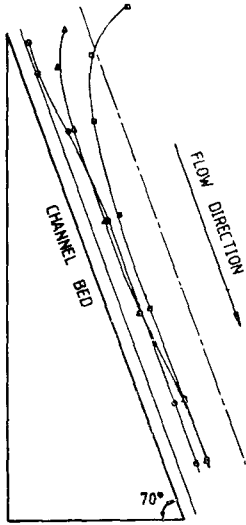
Fig. 13 Comparison of experimental depth of flow with theoretical depth of flow at 40° of channel slope angle



- : Experimental depth of flow(0.031 kg/sec)
- : Theoretical depth of flow(0.031 kg/sec)
- △ : Experimental depth of flow(0.189 kg/sec)
- : Experimental depth of flow(0.509 kg/sec)
- - - : Theoretical depth of flow(0.509 kg/sec)

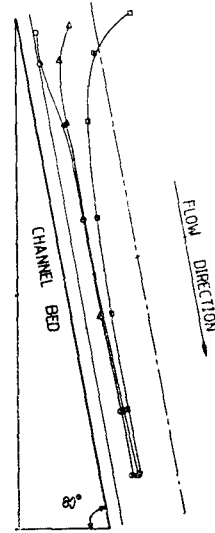
Fig. 15 Comparison of experimental depth of flow with theoretical depth of flow at 60° of channel slope angle

持된다. 또 Re 가 3126 인 경우 水路 入口 部分의 流動 깊이는 水路上을 流動하면서 急激히 減少하고 中端 部에서는 漸次 減少하여 中端部 以後의 位置에서 거의 流動 깊이가 一定하게 維持된다. 또 均一 流動이라 고 려하여 Manning 方程式으로부터 求한 均一 流動 깊이 와 比較해 볼 때 水路 入口 部分에서는 實驗에서 얻은



- : Experimental depth of flow(0.031 kg/sec)
- : Theoretical depth of flow(0.031 kg/sec)
- △ : Experimental depth of flow(0.189 kg/sec)
- : Experimental depth of flow(0.509 kg/sec)
- · - : Theoretical depth of flow(0.509 kg/sec)

Fig. 16 Comparison of experimental depth of flow with theoretical depth of flow at 70° of channel slope angle



- : Experimental depth of flow(0.031 kg/sec)
- : Theoretical depth of flow(0.031 kg/sec)
- △ : Experimental depth of flow(0.189 kg/sec)
- : Experimental depth of flow(0.509 kg/sec)
- · - : Theoretical depth of flow(0.509 kg/sec)

Fig. 17 Comparison of experimental depth of flow with theoretical depth of flow at 80° of channel slope angle

Table 3 Constants of equation, $h=C_0+C_1X+C_2X^2+C_3X^3$

Flow rate (kg/sec)	Reynolds No. (Re)	Channel slope angle (°)	C_0	C_1	$C_2 \times 10^3$	$C_3 \times 10^3$
0.031	186	30	0.643	0.005	-2.079	
		40	0.582	0.008	-2.279	
		50	0.651	-0.032	1.796	
		60	0.630	-0.026	0.955	
		70		0.682	-53.048	3.395
		80		0.723	-71.311	5.179
0.189	1163	30	2.726	-0.157	6.148	
		40	2.521	-0.143	5.075	
		50	2.342	-0.126	4.844	
		60	2.289	-0.143	6.012	
		70		2.203	-131.336	5.088
		80		2.107	-125.184	5.03
0.509	3126	30	6.326	-0.371	14.338	
		40	5.97	-0.37	14.194	
		50	5.26	-0.317	12.167	
		60	5.146	-0.321	12.491	
		70		5.201	-351.747	13.765
		80		4.743	-299.066	11.659

流動 깊이가 均一 流動 깊이 보다 크고 그 後 水路上을 流動하면서 均一 流動 깊이 보다 점점 더 작아져 下端部에서 流動 깊이가 거의 一定하게 維持된다. 以上の 結果를 살펴보면 모든 水路 傾斜度에서 一般적으로 下端部에 거의 流動 깊이가 一定 uniform flow 區間의 設定되는 傾向이 나타나 있다.

Table 3은 Re 가 186, 1163, 3126 인 경우를 代表的으로 curve fitting 한 結果이다. 水路 傾斜度가 30° , 40° , 50° , 60° 인 경우는 7次式의 curve fitting 을 하였고 70° , 80° 인 경우는 6次式의 curve fitting 을 하였으며 10^{-4} 以下の 係數는 無視하였다.

開水路 流動에서는 一般적으로 水路 導入部에 transitory zone 이 있고 水路 끝端의 end effect 가 있다.

그리고 流動 깊이가 거의 一定하게 維持되는 下端部에서는 實驗에서 얻은 流動 깊이가 理論上的 均一 流動이라 고려하여 求한 流動 깊이와 상당한 차이를 보이고 있다. 即 急傾斜 開水路 上의 膜流動은 거의 境界層에 屬하기 때문에 一般적으로 水力學에서 取扱하였던 流動層 下端部에 境界層이 存在하고 그 위에 均一 流動이 있는 경우와는 달리 取扱해야 함을 意味한다.

5. 結 論

以上과 같은 實驗 結果로부터 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 一定幅의 急傾斜 開水路 上을 얇게 물이 流動할 때 層流流動과 遷移流動 領域에서는 流動 깊이가 減少하다가 增加하는 경향을 나타내고 下端部에서는 流動 깊이가 거의 일정하게 維持된다. 流動 깊이가 減少하다가 增加하는 전환점은 Reynolds 數가 增加할수록 下流方向으로 移動한다. 亂流流動領域에서는 流動 깊이가 水路 上端部에서 두꺼웠다가 急激히 減少하고 中端部에서 漸次 減少하여 下端部에는 uniform flow 區間이 設定되는 경향을 나타낸다.

(2) 水路 傾斜度에 流動 깊이의 差가 層流流動領域에서는 上端部에서 작고 下端部에서 큰 데 反하여 遷移流動領域에서는 水路 上端部에서 크고 下端部에서는 거의 一定하게 維持된다. 그리고 流量이 增加할수록 上端部에서 水路 傾斜度에 따른 流動 깊이의 差가 점점 커진다.

(3) 本 實驗에서 水路 下端部로 갈수록 流動 깊이가 一定해지는 uniform flow 區間이 設定되는 경향을 보이고 있는데 이 問題는 깊이가 더 긴 水路를 使用해 봄으로써 境界層의 完全 確立區間을 確認할 수 있다.

References

- (1) W.M. Owen, Laminar to Turbulent Flow in a Wide Open Channel, American Society of Civil Engineers, Vol. 79, No. 188, pp.1~8, April 1953
- (2) L.G. Straub, E. Silberman and H.C. Nelson, Open-Channel Flow at Small Reynolds Numbers, American Society of Civil Engineers, Vo. 123, Paper No. 2935, pp.685~706, 1958
- (3) P.S. Chisholm and G. Tsang, The Manning Equation and Boundary Resistance, Water Pollution Control Federation, Journal, Vol. 42, No. 5, Part. 1, pp.753~757, 1970
- (4) V.V. Jayaraman, Resistance Studies on Smooth Open Channels, Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 96, No. HY5, pp.1129~1142, May 1970
- (5) Ir. J. Berlamont, De Stabiliteit Van de in Open Kanalen met Rechthoekige Doorsnede, Revue C Tijdschrift Civ Tech Genie Civ, Vol. 6, No. 9~10, pp.263~272, 1974
- (6) O.N. Wakhlu, A Dimensionless Number for the Study of Channel Flow, Proc. Instn. Civ. Engrs., Vol. 59, Part 2, pp.515~522, 1975
- (7) S.S. Nabi, M. Jamil and S.S. Shah, Laminar Open Channel Flow, Irrigation Power, Vol. 32, No. 1, pp.87~94, 1975
- (8) J.J. Sharp, Approximation Errors in Open Channel Flow Computation, Water Power & Dam Construction, Vol. 29, No. 3, pp.34~38, 1977
- (9) C.C.S. Song and C.T. Yang, Velocity Profiles and Minimum Stream Power, Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 105, No. HY 8, pp.981~998, August 1979
- (10) W.R.C. Myers, Flow Resistance in Wide Rectangular Channels, Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 108, No. HY4, pp.471~482, April 1982
- (11) James E.A. John and William L. Haberman, Introduction to Fluid Mechanics, 2nd ed., Prentice-Hall, Inc., pp.293~324, 1980
- (12) Ray K. Kinsley, Max A. Kohler and Joseph L.H. Paulhus, Hydrology for Engineers, McGraw-Hill Book Co. p.325, 1958