

# 複斷面 水路에서의 水理學的 特性에 관한 研究

A Study on the Hydraulic Characteristics in a Compound Channel

鄭 東 國\*  
Jeong, Dong Guk  
安 守 漢\*\*  
Ahn, Soo Hahn

## Abstract

Natural river channels usually have a deep section and one or two floodplains, which is called a compound channel. As the general method in the compound channel overestimates the discharge capacity, the momentum transfer due to interaction between the main channel flow and flow over its floodplain must be considered. Scale model experiments are performed for the rectangular main channel with an asymmetrical floodplain. Firstly, velocities are measured at various section grids. Secondary, boundary shear stresses are calculated from velocity distributions. Lastly, in order to determine the apparent shear force, the shear stress distributions are integrated along the wetted perimeter for the full cross-section and equated to the total weight force in the flow direction. The hydraulic characteristics in a compound channel are closely examined with the scales of length, velocity, boundary shear stress, and apparent shear force which are described with the various relationships.

## 要 旨

一般的으로 大規模 河川은 低水路와 高水敷地를 갖는 複斷面水路로 되어 있다. 複斷面 水路에 대한 일반적인 해석방법은 低水路에서 高水敷地로의 運動量 傳達를 무시하였기 때문에 소용능력을 과대하게 評價하는 경향을 보여왔다. 따라서 本 研究에서는 運動量 傳達를 고려하여 비대칭 高水敷地를 갖는 矩形斷面의 實驗水路에서 實驗하였으며, 단면의 여러 점에서 流速을 測定하고 流速分布로부터 경계층의 전단응력을 계산하여 윤변을 따라 이를 積分하여 걸보기 전단력을 구한다. 그리고 複斷面 水路에서의 水理學的 特性을 實驗斷面의 流速分布, 경계층의 剪斷應力, 그리고 걸보기 전단력 등의 여러 가지 관계로부터 규명하였다.

## 1. 序 論

一般的으로 大規模 河川의 경우에는 低水路와

高水敷地를 갖는 複斷面 水路로 취급하는 것이 便利하다. 특히 大規模 河川의 改修나 整備를 위하여 複斷面 水路의 特性에 관한 分析이 必要하다. 複斷面 水路의 경우에 流量이 적은 경우

\* 正會員·서울大學校 大學院  
\*\* 正會員·서울大學校 工科大學 教授

는水深이 高水敷地까지 미치지 않는 單斷面水路에서 취급되지만, 洪水發生 등으로 인한 流量의 증가로 水深이 高水敷地까지 미칠 경우에는 高水敷地가 流量의 一部分을 담당하게 되어 複斷面水路의 特性을 나타낸다. 그러나 지금까지 矩形이나 사다리꼴 단면에 대한 水理學的 現象에 관해서는 많은 研究들이 행하여졌으나 國內에서는 複斷面水路의 水理學的 特性에 관한 研究는 미비한 實情이다. 따라서, 本 研究에서는 實驗結果를 分析檢討하여 複斷面水路의 흐름에 대한 水理學的 特性을 규명하고자 한다.

複斷面水路에 관한 現在까지의 研究는 運動效果(kinematic effect)라 불리우는 低水路와 高水敷地上的 흐름의 상호작용에 관한 것으로서 종래의 斷面分割法에 의한 流量算定의 不合理性을 제거하고 低水路와 高水敷地 相互間의 흐름 特性을 다루고 있다. 이때의 흐름특성은 低水路와 高水敷地 사이의 境界面에서 運動量 傳達에 의한 상호작용에 관한 것이며 이 運動量 傳達에 의하여 低水路 및 高水敷地上的 流速 및 剪斷應力의 변화가 일어난다. 이러한 特性에 관한 研究는 Zheleznyakov<sup>(15)</sup>에 의하여 처음으로 시도되었고, 그 후 Sellin<sup>(12)</sup>과 Townsend,<sup>(13)</sup> 그리고 Rajaratnam과 Ahmadi<sup>(10,11)</sup> 등에 의하여 비대칭 高水敷地를 갖는 矩形斷面에 대한 研究로 발전되었고, 混合領域(mixing region)에서의 剪斷應力 및 流速에 관한 연구는 Ghosh와 Jena<sup>(8)</sup>, Myers와 Elsayw<sup>(6,7)</sup>, 그리고 Knight, Demetriou 및 Hamed<sup>(4,5)</sup> 등에 의하여 보다 자세히 수행되었다. 또한, Wormleaton, Allen 및 Hadjipanos<sup>(14)</sup>는 複斷面水路의 유량분배에 대하여, 그리고 玉井과 河原<sup>(16)</sup>는 境界面에서 發生하는渦에 관하여 研究하였다.

이상과 같은 複斷面水路에 관한 지금까지의 研究를 기초로 하여 本 研究에서는 비대칭水路를 채택하여 複斷面水路에서의 運動量 傳達에 의한 유속 및 전단응력과 水深 및 단면의 橫方向 거리에 대한 여러 변수의 관계를 圖式化하였다. 그리고, 境界층내에서의 전단응력의 산정은 난류내의 혼합거리 理論과 層流底層(laminar sublayer) 내의 粘性에 의한 應力理論을 적용하고 Patel<sup>(6)</sup>의 관계식을 도입하여 決定하였다.

## 2. 理論的 背景

### 2.1. 運動量 方程式

等流狀態의 閉水路 흐름에 대하여 그림 2. I 과 같은 control volume 에 運動量 方程式을 적용하면

$$F_1 - F_2 + W \cdot \sin \theta - F_f = \eta \rho Q (V_2 - V_1) \dots (2.1.1)$$

여기서,  $F_1, F_2$  : 靜水壓

$W \cdot \sin \theta$  : 重力에 의한 힘의 흐름방향 성분

$F_f$  : 水路의 剪斷力

$\eta$  : 運動量 補正係數

$V_1, V_2$  : 斷面の 平均流速

$\rho$  : 流體의 밀도

$Q$  : 流量

이다. 式(2.1.1)에서 等流狀態의 靜水壓  $F_1$  과  $F_2$ , 그리고 流速  $V_1$  과  $V_2$  는 같기 때문에 흐름 방향의 作用力은 重力에 의한 것과 벽면의 剪斷力 뿐이다.

여기서, 剪斷力은 水路의 全 周面に 作用하는 剪斷力과 低水路에서 高水敷地로의 運動量 傳達에 의한 겉보기 剪斷力(apparent shear force)의 합으로 나타난다.

$$W \cdot \sin \theta = S_f + S_A$$

따라서,  $S_A = W \cdot \sin \theta - S_f \dots \dots \dots (2.1.2)$

여기서,  $S_A$  는 겉보기 剪斷力이고  $S_f$  는 水路벽면에 作用하는 剪斷力이다. 그러므로,  $W$  와  $S_f$  를 구하면  $S_A$  를 算定할 수 있다.

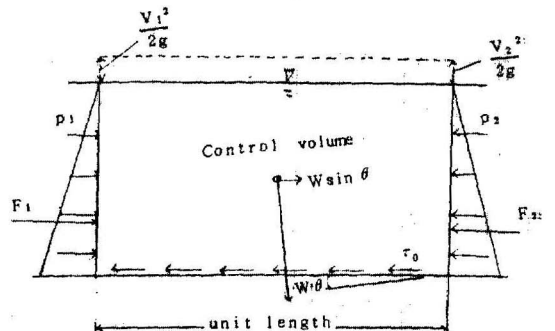


그림 2.1. 定常等流狀態의 힘의 平衡

2.2. 剪斷應力(Shear stress)

水路 바닥과 벽면에 의한 저항력 \$S\_F\$ 는水路 벽면에 作用하는 剪斷應力을 斷面의 全 周변에 대하여 積분한 값이다. 따라서, \$S\_F\$ 를 決定하기 위해서는 剪斷應力의 算定이 先行되어야 한다.

난류속의 平均흐름 方向의 마찰력은 난류의 平均속도에 의한 마찰應력과 난류속의 변동속도에 의한 Reynolds 應力을 합한 값이다. 前者의 값은 後者의 값보다 작으므로 난류속의 마찰應력은 後者만으로 表示할 수 있다. 난류의 변동속도에 合한거리 理論을 적용하여 流速分布를 求하면

$$u = \frac{U_*}{\kappa} \log \frac{y}{y_0} \dots\dots\dots(2.2.1)$$

여기서, \$u\$ : 水路바닥으로부터 \$y\$만큼 떨어진 지점의 流速

\$U\_\*\$ : 마찰속도 (= \$\tau\_0/\rho\$)

\$\kappa\$ : Karman's universal constant (= 0.4)

\$y\$ : 水路바닥으로부터의 거리

\$y\_0\$ : 水深

으로 表示되고, 이 식은 Prandtl-Karman의 對數分布式이다<sup>(1)</sup>. 式(2.2.1)에 滑面水路의 조건, 즉 \$y\_0 U\_\* / \nu = \text{const.}\$를 적용하여 Nikurase가 제안한 實驗式은

$$\frac{u}{U_*} = 5.5 + 5.75 \log_{10} \frac{U_*}{\nu} y \dots\dots(2.2.2)$$

\$\nu\$ : 動粘性係數

이다.

그리고, Preston<sup>(9)</sup>은 式(2.2.2)에 근거를 두고 層流底層내에 pitot-tube를 사용하여 靜水壓과 動水壓의 차와 剪斷應力의 關係를 나타내는 다음과 같은 實驗式을 제안하였다.

$$\log_{10} \frac{\tau_0 d^2}{4\rho\nu^2} = 2.604 + \frac{7}{8} \log_{10} \frac{(P-P_0)d^2}{4\rho\nu^2} \dots\dots(2.2.3)$$

\$P-P\_0\$ : 動水壓과 靜水壓의 差

\$d\$ : pitot-tube의 外徑 (= \$2y\$)

式(2.2.3)에 동수압과 정수압의 차와 流速과의 關係식 \$u = \sqrt{2g(P-P\_0)/\omega}\$를 적용하면

$$\log_{10} \frac{\tau_0 y^2}{\rho\nu^2} = 2.604 + \frac{7}{8} \log_{10} \frac{u^2 y^2}{2\nu^2} \dots\dots(2.2.4)$$

이 된다. 式(2.2.4)를 Patel<sup>(6)</sup>이 여러 가지 적용영역에 대하여 실험하여 다음과 같은 조정된 式을 제안하였다.

$$y^* = 0.8287 - 0.1381x^* + 0.1437x^{*2} - 0.0063x^{*3} \dots\dots\dots(2.2.5)$$

여기서, \$y^\* = \log\_{10}(\tau\_0 y^2 / \rho\nu^2)\$, \$x^\* = \log\_{10}(u^2 y^2 / 2\nu^2)\$이고, \$1.5 < y^\* < 3.5\$ 범위에서 잘 成立한다.

式(2.2.5)로부터 \$\tau\_0\$를 求하고, \$\tau\_0\$를 全 周변에 대하여 積분하여 \$S\_F\$를 求한다.

3. 實驗裝置 및 實驗方法

實驗水路는 水路傾斜 1 : 2,000, 길이 15 m의 木材水路를 사용하고, 測定斷面은 그림 3.1과 같이 低水路 폭 36.6 cm, 高水敷地 폭 25.1 cm, 그리고 저수로에서 고수부지까지의 높이는 10 cm로 하였다.

測定斷面은 水面變動이 流入口로부터 영향을 받지 않는 流入口 아래 9 m 지점을 택하고 6가지 流量에 대하여 다음의 순서에 따라 실험하였다.

- 1) 水路끝의 水流調節用 水門으로 흐름을 等流狀態로 조절하고, 測定斷面과 前後 1 m 間격에 point-gage로써 등류상태를 확인한 후 水深을 측정한다.
- 2) 流速을 저수로에서는 횡방향으로 2 cm 間격, 수직방향으로 1 cm 間격, 그리고 고수

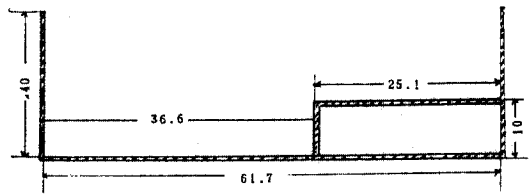


그림 3.1. 水路斷面圖

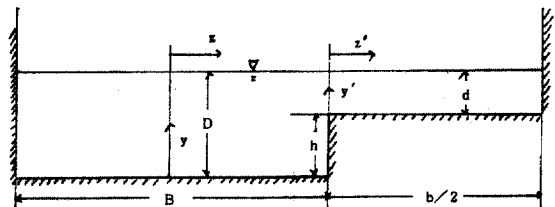


그림 3.2. 斷面座標係

부지에서는 각각 2 cm 와 0.5 cm 간격으로  
 水面까지 流速을 測定한다.

3) 수온을 측정하여 물의 密度 및 動粘性係數  
 를 決定한다.

그리고, 실험에 앞서 흐름을 저수로에 국한하  
 여 水路의 조도계수  $n$  을 산정하였다. 測定斷面  
 의 횡방향 및 연직방향의 좌표계는 그림 3.2 와  
 같다.

#### 4. 實驗結果 및 分析

實驗條件別 測定資料 및 計算結果는 表 4.1 과  
 같다.

##### 4.1. 水位—流量曲線

그림 4.1 과 같이 흐름이 고수부지상에 미치  
 는 천이시에는 水位—流量曲線의 不連續性이 나  
 타나고 수심이 저수로를 초과하는 순간의 유량

은 흐름이 저수로에 局限되었을 때의 유량보다  
 적다는 것을 알 수 있다. 그리고, 水深이 상당  
 히 큰 경우에는 Manning의 단면분할법<sup>(2)</sup>에 의  
 한 유량해석이 가능하지만 수심이 얇은 경우에  
 는 複斷面 水路로서 취급해야만 한다.

##### 4.2. 流速 및 剪斷應力의 分布特性

單斷面 水路의 경우, 流速의 橫方向 分布 및  
 水路바닥의 剪斷應力分布特性은 流速 및 剪斷應  
 力이 水路中央에서 最大가 되고 水路벽면에 가  
 가까울수록 대칭으로 감소한다. 流速의 종방향 분  
 포 및 水路벽면의 斷面應力 分布特性은 流速 및  
 剪斷應力이 수로바닥으로부터 멀수록 증가하다  
 가 수면근처에서 다시 감소한다.

複斷面 水路의 流速의 橫方向 分布와 剪斷應  
 力의 分布特性을 單斷面 水路와 비교하면 그림  
 4.2.1 과 4.2.2 와 같이 低水路 中央部에서 좌측  
 벽면까지는 單斷面 水路와 같고 우측 벽면에 가  
 가까워질수록 單斷面 水路의 경우보다 감소한다.

表 4.1. 實驗條件別 資料 및 計算結果

EX-PT	수심 $D$ (cm)	단면적 $A$ (cm <sup>2</sup> )	유량 $Q$ (l/sec)	Manning $Q$ (l/sec)	평균유속 $V$ (m/sec)	$S_A$ (N)	$\tau_A$ (N/m <sup>2</sup> )	Froude Number	Reynolds Number	상대 수심 ( $D/d$ )
1	15.52	706.6	30.62	29.71	0.433	0.0426	0.722	0.502	28,937	2.812
2	14.46	641.2	26.69	26.00	0.416	0.0493	1.104	0.500	25,813	3.242
3	13.78	599.2	23.91	23.73	0.399	0.0504	1.333	0.492	23,477	3.646
4	12.76	536.3	19.89	20.49	0.371	0.0642	2.326	0.478	19,986	4.623
5	12.46	517.8	18.72	19.59	0.362	0.0613	2.493	0.473	18,945	5.065
6	11.98	488.2	17.18	18.19	0.352	0.0578	2.920	0.471	17,580	6.051

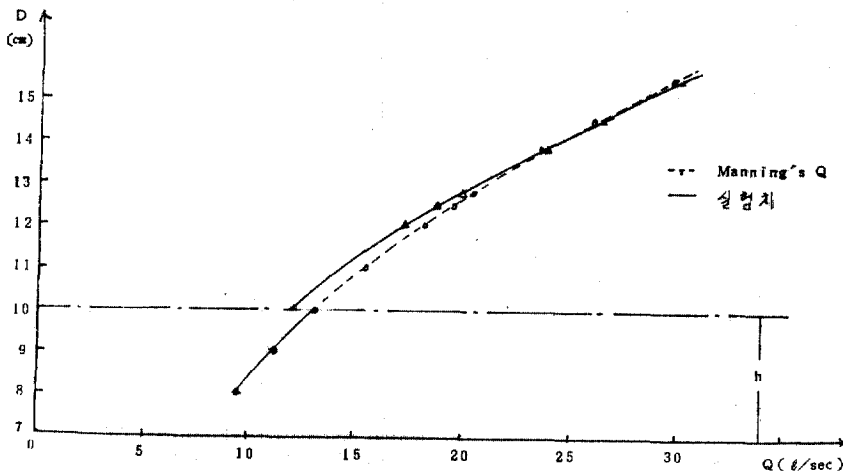


그림 4.1. 斷面分割法에 의한 流量의 比較

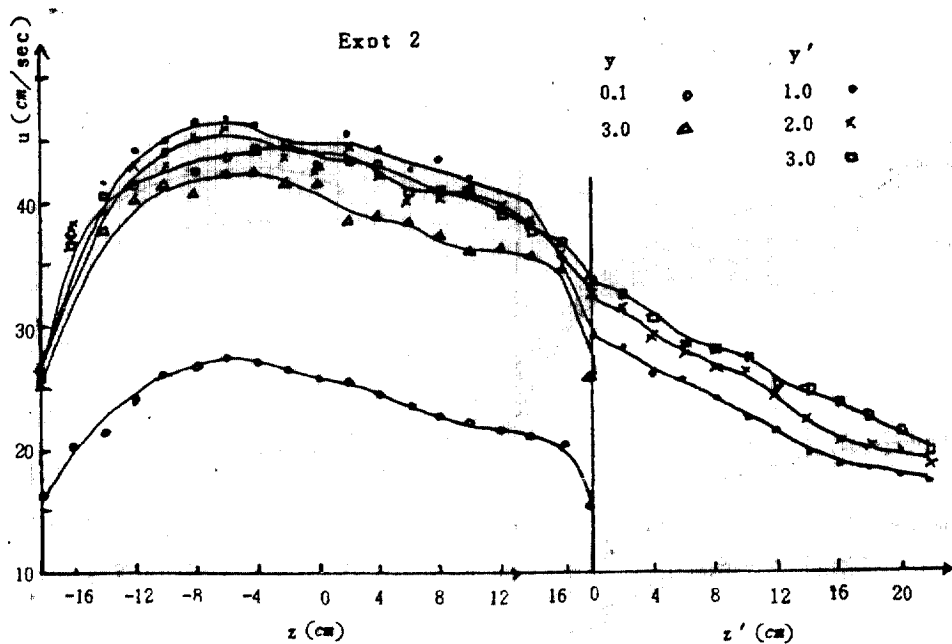


그림 4.2.1. 断面内の 横方向 流速分布

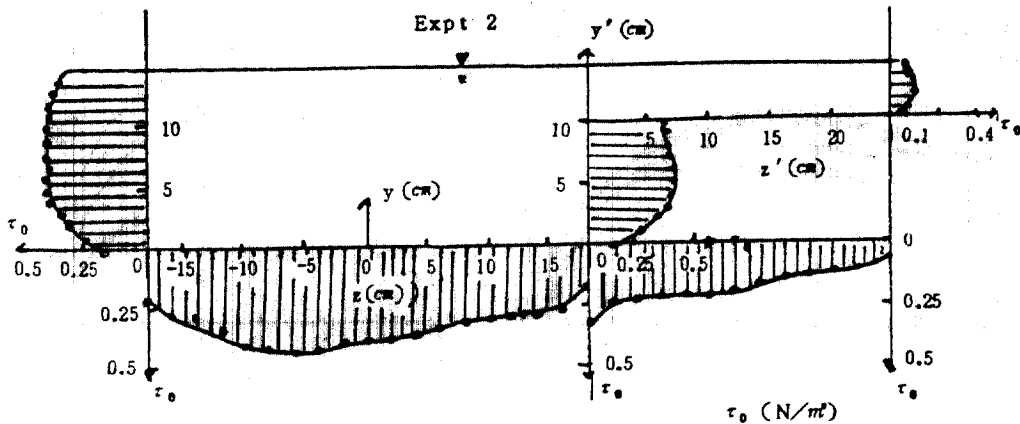


그림 4.2.2. 水路 벽면의 剪斷應力 分布

高水敷地에서는 單断面 水路와 달리 低水路에 가까울수록 증가한다. 이것은 저수로에서 고수부지로의 運動量 傳達에 의하여 低水路部の 流速을 감소시키고 고수부지상의 流速을 증가시키기 때문이다. 그리고, 流速 및 剪斷應力의 最大値는 低水路 中央에서 水深이 증가함에 따라 좌측으로 이동하다가 다시 中央으로 이동한다(그림 4.2.3).

流速의 증방향 분포는 그림 4.2.4와 같이 저수로 증앙에서 좌측벽면까지는 單断面 水路의 경우와 같으나, 高水敷地에 가까운 영역에서는 高

水敷地 근처 水深의 流速이 감소하다가 水面 근처에서 다시 증가하는 特性을 나타낸다. 高水敷地에서는 境界面 근처에서 單断面 水路일 때의 流速보다 加速된 分布特性을 나타낸다.

#### 4.3. 걸보기 전단력

低水路에서 高水敷地로의 運動量 傳達로 인하여 나타나는 걸보기 剪斷力의 存在 때문에 식 (2.1.2)에서 항상  $W \cdot \sin \theta > S_F$  이고,  $S_A$ 는 저수로내에서의 重力에 의한 흐름방향의 힘의 25% 까지 나타나고 高水敷地上에서는 200% 까지 나타난다.

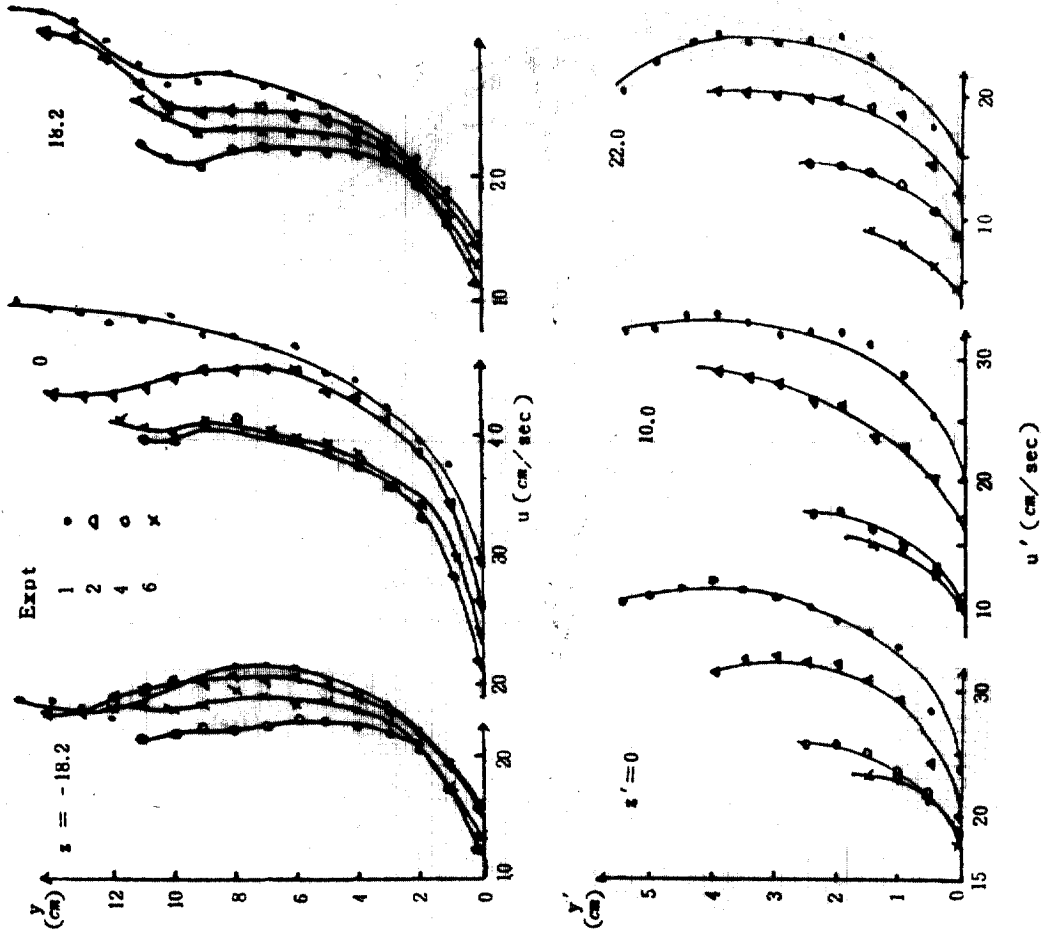


그림 4.2.3. 斷面內의 鉛直方向 流速分布

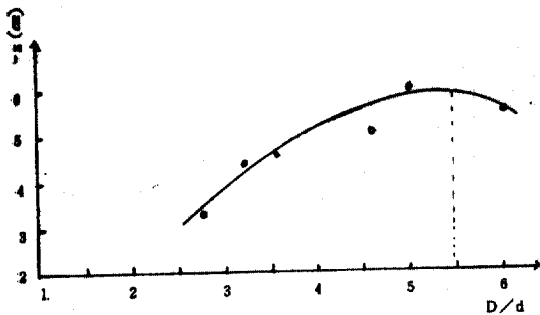


그림 4.2.4. 最大流速 및 剪斷應力이 발생하는 점의  
저수로 증상으로로부터의 횡방향거리와 상  
대수심과의 관계

그리고, 그림 4.3.1은 걸보기 전단력  $S_A$ 를 Reynolds number 와 상대수심  $d/D$ 에 대하여 나타낸 것이다.  $S_A$ 를 低水路와 高水敷地의 境界面積으로 나누면 걸보기 적단응력  $\tau_A$ 가 되고, 이것은 混合領域에서의 渦의 強度를 나타내는데, 그림 4.3.2와 같이 最低水深에서 最大가 되고 水深이 증가함에 따라 점점 감소한다. 그러나, 이것이 境界面積을 곱한  $S_A$ 는 그림 4.3.1과 같이 상대수심이 0.24일 때에 최대가 되고 그 후, 水深이 증가함에 따라 渦의 強度는 감소하여 複斷面의 特性이 사라지게 되고 결과적으로 單斷面水路로서의 취급이 可能해진다.

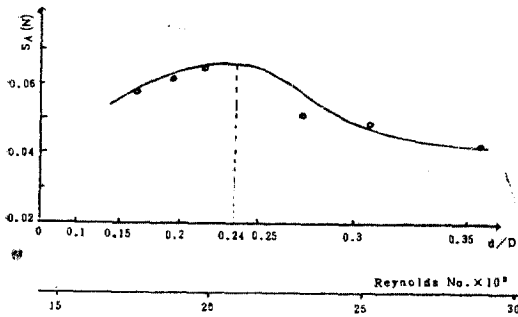


그림 4.3.1. 걸보기 전단력과 상대수심 및 Reynolds No.와의 관계

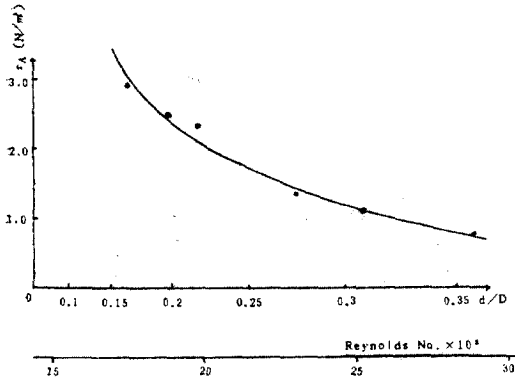


그림 4.3.2. 걸보기 전단응력과 상대수심 및 Reynolds No.와의 관계

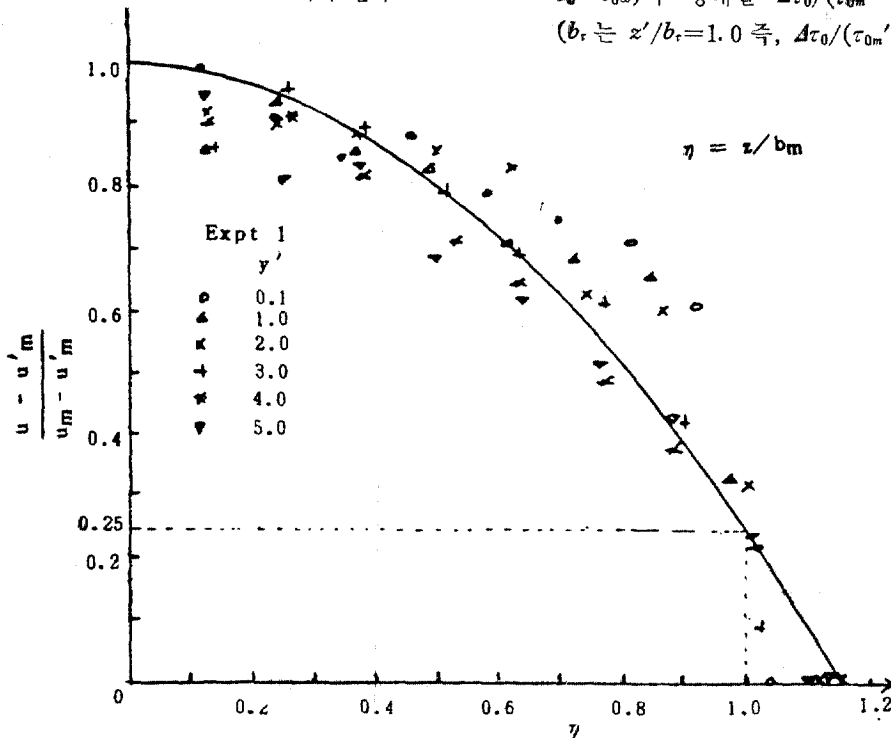


그림 4.4.1. 低水路에서의 횡방향流速에 대한相似

#### 4.4. 流速과 剪斷應力에 대한 無次元 變數들과의 關係

低水路의 橫方向 流速分布에서  $(u - u_m') / (u_m' - u_m')$ 를  $\eta = z/b_m$  ( $b_m$ 은  $\eta = 1.0$  즉,  $(u - u_m') / (u_m' - u_m') = 0.25$  일 때의  $z$ )에 대응해서 나타내면,

$$\frac{u - u_m'}{u_m' - u_m'} = 1 - 0.75\eta^2; \quad y'/d \geq 0.1 \dots \dots (4.4.1)$$

- $u_m'$  : 저수로와 고수부지 경계면의 유속
- $u_m$  : 저수로 중앙의 유속
- $u$  : 저수로 유속

이다(그림 4.4.1).

그리고, 高水敷地에서도 유속분포를  $(u' - u_\infty) / (u_m' - u_\infty)$ 와  $\eta' = z'/b_f$  ( $b_f$ 는  $\eta' = 1.0$  즉,  $(u' - u_\infty) / (u_m' - u_\infty) = 0.5$  일 때의  $z'$ )로 나타내면,

$$\frac{u' - u_\infty}{u_m' - u_\infty} = e^{-0.7\eta'^2} \dots \dots \dots (4.4.2)$$

- $u_\infty$  : 고수부지의 undisturbed  $u'$
- $u'$  : 고수부지상의 유속

이다(그림 4.4.2). 또한, 高水敷地の 剪斷應力 分布에 대한 高水敷地上的의 초과 剪斷應力( $\Delta\tau_0 = \tau_0 - \tau_{0\infty}$ )의 형태를  $\Delta\tau_0 / (\tau_{0m}' - \tau_{0\infty})$ 과  $\eta_r = z'/b_r$  ( $b_r$ 는  $z'/b_r = 1.0$  즉,  $\Delta\tau_0 / (\tau_{0m}' - \tau_{0\infty}) = 0.5$  일 때

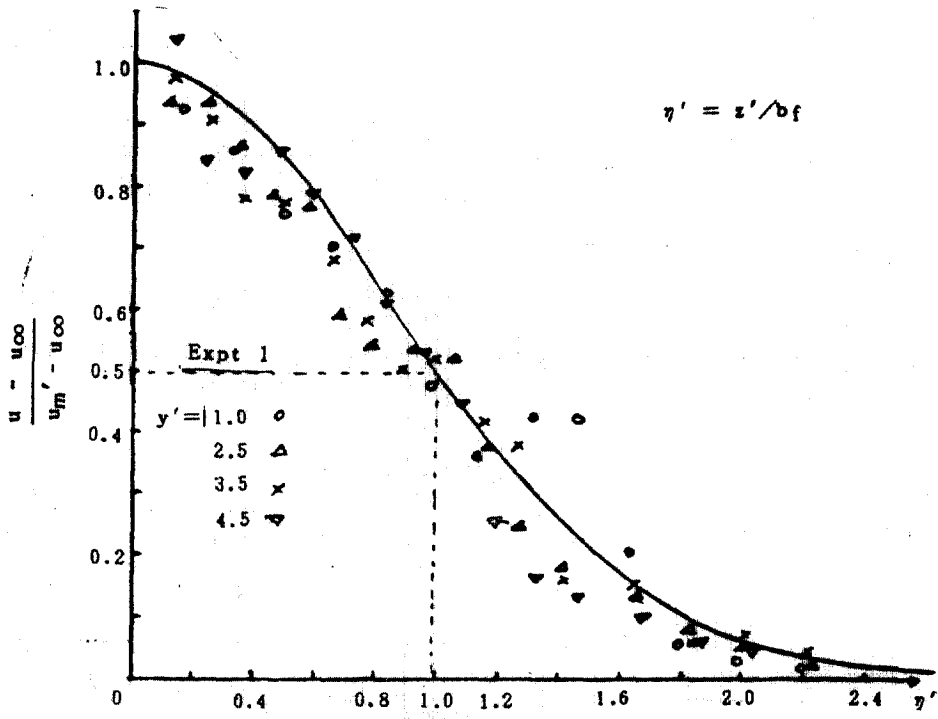


그림 4.4.2. 高水敷地에서의 횡방향流速에 대한 相似

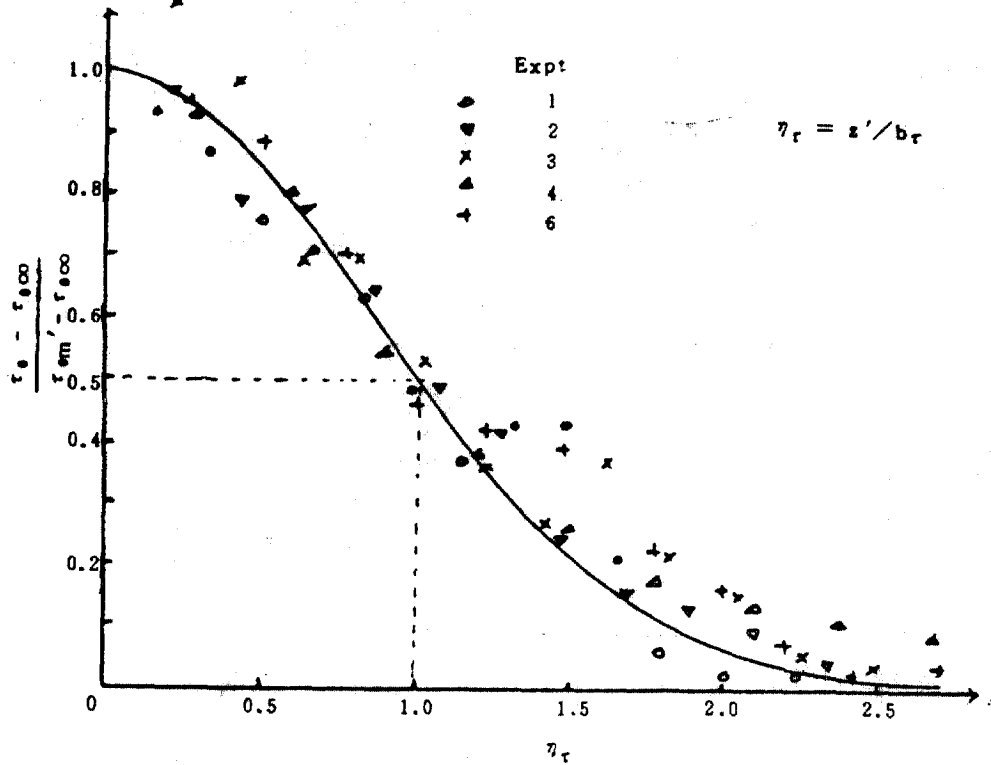


그림 4.4.3. 高水敷地에서의 剪斷應力에 대한 相似

의  $z'$ 의 관계로 나타내면,

$$\frac{\tau_0 - \tau_{0m}}{\tau_{0m} - \tau_{0\infty}} = e^{-0.7\eta_r^2} \dots\dots\dots(4.4.3)$$



$\tau_{\infty}$  : 고수부지의 undisturbed  $\tau_0$

$\tau_{0m}'$  :  $z'=0$ 에서의  $\tau_0$

이다(그림 4.4.3).

## 5. 結 論

비대칭 高水敷地를 갖는 複合斷面 水路의 低水路에서 高水敷地로의 運動量 傳達로 인한 相互作用에 대한 實驗의 研究를 통해서 아래와 같은 結論을 얻었다.

- 1) 低水路에서 高水敷地로의 運動量 傳達에 의하여 고수부지에 가까운 저수로 영역에서 유속 및 전단응력이 감소하고 고수부지 先端으로부터 運動量 傳達의 영향을 받는 영역에서는 유속 및 전단응력이 증가하는 것을 알 수 있다.
- 2) 고수부지 수심이 얇은 경우에 종래의 단면분할법에 의한 유량 산정의 不合理性을 인정할 수 있다.
- 3) 運動量 傳達의 영향을 받는 領域의 流速 및 剪斷應力 分布로부터 무차원량과 길이에 대한 무차원 변수로 表示하여 그 값들의 상호 연관성을 확인하였다.
- 4) 低水路와 高水敷地 境界面에서 發生하는 渦의 강도가 수심에 따라 변화하는 것을 확인하였다.

低水路와 高水敷地 흐름의 상호작용을 보다 자세히 研究하기 위해서는 운동량 전달에 의한 低水路에서 高水敷地로 향하는 2次元 흐름에 대한 實驗 및 分析이 필요하며 低水路와 高水敷地 境界面에서 發生하는 渦의 特性을 可視化하여 數學的인 方法과 함께 研究되어야 할 것이다.

## 參 考 文 獻

1. 安守漢, 水理學, 東明社, 1980.
2. Chow, V.T., *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, 1959.
3. Ghosh, S.N. and S.B. Jena, "Boundary Shear Stress Distribution in Open Channel Compound", *PICE*, London, Vol. 49, Aug., 1971, pp. 417~430.
4. Knight, D.W., and J.D. Demetriou, "Flood Plain and Main Channel Flow Interaction", *J. of Hydraulic div., ASCE*, Vol. 109, Aug., 1983, pp. 1073~1092.
5. Knight, D.W., and M.E. Hamed, "Boundary Shear in Symmetrical Compound Channels", *J. of Hydraulic div., ASCE*, Vol. 110, Oct., 1984, pp. 1412~1430.
6. Myers, W.R.C., "Momentum Transfer in a Compound Channel", *J. of Hydraulic Research, Delft*, Vol. 16, No. 2, 1978, pp. 139~150.
7. Myers, W.R.C., and E.M. Elsaywy, "Boundary Shear in Channel with Flood-plain", *J. of Hydraulic div., ASCE*, Vol. 101, Jul., 1975, pp. 933~946.
8. Patel, V.C., "Calibration of the Preston Tube and Limitations on its use in Pressure Gradients", *J. of Fluid Mech.*, Vol. 23, 1965, pp. 185~208.
9. Preston, J.H., "The Determination of Turbulent Skin Friction by Means of Pitot Tubes", *J. of Royal Aero. Soc.*, Vol. 58, 1964, pp. 109~121.
10. Rajaratnam, N., "Interaction between Main Channel and Flood-plain Flows", *J. of Hydraulic div., ASCE*, May., 1979, pp. 573~588.
11. Rajaratnam, N., and R. Ahmadi, "Hydraulics of Channels with Flood-plains", *J. of Hydraulic Research, Delft*, Vol. 19, 1981, pp. 43~58.
12. Sellin, R.H.J., "A Laboratory Investigation into the Interaction between the Flow in the Channel of a River and that over its Flood Plains", *La Houille Blanche*, No. 7, 1964, pp. 793~801.
13. Townsend, D.R., "An Investigation of Turbulence Characteristics in a River Model of Complex Cross Section", *PICE*, London, Vol. 40, Jan., 1968, pp. 155~175.
14. Wormleaton, P.R., A. John, and P. Hadjipanos, "Discharge Assessment in Compound Channel Flow", *J. of Hydraulic div., ASCE*, Vol. 108, Sep., 1982, pp. 975~994.
15. Zheleznyakov, G.V., "Interaction of Channel and Flood-Plain Streams", *IAHR Cong.*, Vol. 5, 1971, pp. 144~148.
16. 玉井 信行, 河原 能久, "複斷面開水路流わの特性と抵抗則に關する研究." 日本 第25回 水理講演會 論文集, 1981. 2, pp. 113~118.

(接受 : 1985. 10. 30)