

開水路內의 高速度 흐름

安 守 漢

第三編 幅이 縮小하는 水路의 設計

1. 要 旨

常流의 境遇에 幅이 縮小하는 水路에 對해서는 境界를 適當한 流線型으로 하면 Energy의 損失이 最小이 되겠끔 設計할수있다. 그러나 射流의 境遇는 攪亂과 停止波를 減小시키든가 또는 除去하겠끔 設計해야한다.

現在까지는 이와같은 設計를 模型實驗에 依하여 實驗的으로 解決해왔으나 本論文에 있어서는 射流에 關한 上述의 原理를 幅이 縮小하는 水路의 設計에 應用할수있다는 것과 攪亂波를 最小로 할수있는 解法을 實驗의 結果에 依하여 提示하고 있다.

그리고 幅이 縮小하는 水路內에서 일어나는 跳水의 位置는 勿論 그의 크기도 明白히되고 下流側水路에 생기는 攪亂을 除去하는 方法도 論議되어 있다.

II. 設計上의 一般의 注意

幅이 다른 두개의 水路를 連結하는 部分의 設計는 常流에 對해서는 Energy損失이 最小이 되겠끔 하지만 射流이 되면 停止波가 생기므로 全然 다른面에서 研究해야한다.

結論을 먼저 말하자면 이와같은 種類의 問題는 Energy 損失이 最小이 되는 經濟的인 構造란 다면 停止波를 除去할수없다. 그러므로 좋은 設計를 하려면 停止波의 特性을 詳細하게 研究하여야한다. 射流에 對해서는 停止波가 最小이 되도록 設計하는 것이 主目的이며 이와같은 여러 가지의 問題는 Lehigh 大學과 M.I.T에 있어서, 1938年에서 1937年 사이에 研究되었다. 그 後 實驗이 繼續中이나 그 主要한 結果를 要約하여 本論文에 記載하고 있다.

III. 圓弧로 된 縮少斷面水路

Lehigh大學에서 처음으로 實驗한 水路는 Fig 35와 같은 것이며 두개의 같은 曲率을 가진 圓弧로 되어 있다. 이水路의 寸수는 從來의 開水路에 對한 知識으로 設計한 代表的인 것이다. (本論文에는 이水路를 射流가 흐르는 狀態를 明白히 볼수있는 寫眞이 있으나 여기서는 省略함)

水路內의 mach波는 서로 交叉하고 그 높이는 最初의 水路의 水深보다 큰 境遇로 있다. 連絡水路를 形成하는 두개의 圓弧의 끝은 같고 中心角은 16度이다. 圓弧의 曲率半徑은 75inch이고 水路幅은 上流에 있어서 2ft이고 下流에 있어서 1ft이며 길이는 30ft이다. 이水路는 鐵로 만든

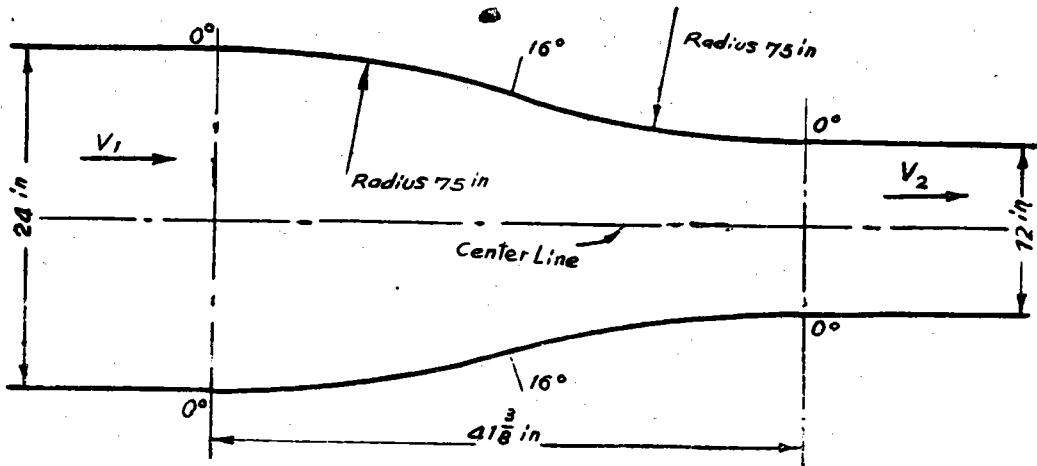


Fig. 35 - Contraction Composed of Circular Arcs

Flame에 의하여 支持되어있고 上流의 水流가 等流가 되겠끔 底面勾配를 調節하게 되어 있다.

그리고 Froude 數 $Fr=2\sim 12$ 에 對하여 適當한 流速 및 水深을 가지며 물은 矩形 Nozzle을 通해서 水路에 流入하게 되어있고 Nozzle은 適當한 水深을 維持하게끔 調節하게 되어있다. 그리고 流量은 Venturi計에 依하여 測定하게 되어있다.

Fig. 37 에는 이 水路의 常流 및 射流에 對한 水面等高線이 주어저있다. 이그림에 依한 몇가지 特性을 說明하면 다음과 같다.

(a) 縮小斷面部の水位等高線

Fig. 37(a)는 $F=0.36$ 의 흐름, 卽 常流에 對한 水位 等高線이며, 橫斷面은 水位가 大略 一定 하지만 (b)의 境遇는 $F=4$, 卽 射流이며, 水位가 一定하지않다.

(b) 側壁에 沿한 水位 같은 縮小部에 對하여 Froude 數을 變化시킬때 側壁에 沿한 水位의 變化

는 Fig. 39에 表示되어있다. 16° 의 地點에서 水位는 一般의 最大가 되고 이點에서 처음으로 (-)의 攪亂波가 생긴다. 凸曲線의 終點에 있어서 水深은 最初의 水深 h_1 으로 되돌아가고 Froude 數도 側壁에 沿해서는 最初의 Froude 數와 같이 되어야 한다.

跳水가 생기지 않는 最小의 흐름은 $F=3$ 이고 Froude 數가 1에 가까우수록 流速의 變化에 比해서 水深에 變化가 크다는것을 Fig. 39에서 알 수 있다. 이와같은 境遇는 垂直方向의 流速을 無視 못 하게 된다. $F=4\sim 8$ 의 範圍에 對해서는 攪亂에 依한 水位上昇의 最高值에 限해서는 대단히 잘 一致한다. $F\sim 12$ 의 境遇는 理論과 一致하지 않으나 이것은 側壁에 沿한 最高水深이 最初의 水深의 倍나 됨으로 垂直加速度가 대단히 크기 때문이다. 따라서 큰 Froude 數에 對해서는 縮小部에 使用하는 曲線壁의 中心角을

適當히 작게하고 曲線의 長이를 길게하는 것이 좋다.

$\frac{h}{h_1}$ 의 값에 對하 必要한 中心角은 Fig. 3에서 初期條件만 주어지면 決定할수 있다. 理論的으로는 凹凸兩曲線이 같은 形狀이면 水位도 對稱이 되고 中心角이 같으면 曲線의 如何에는

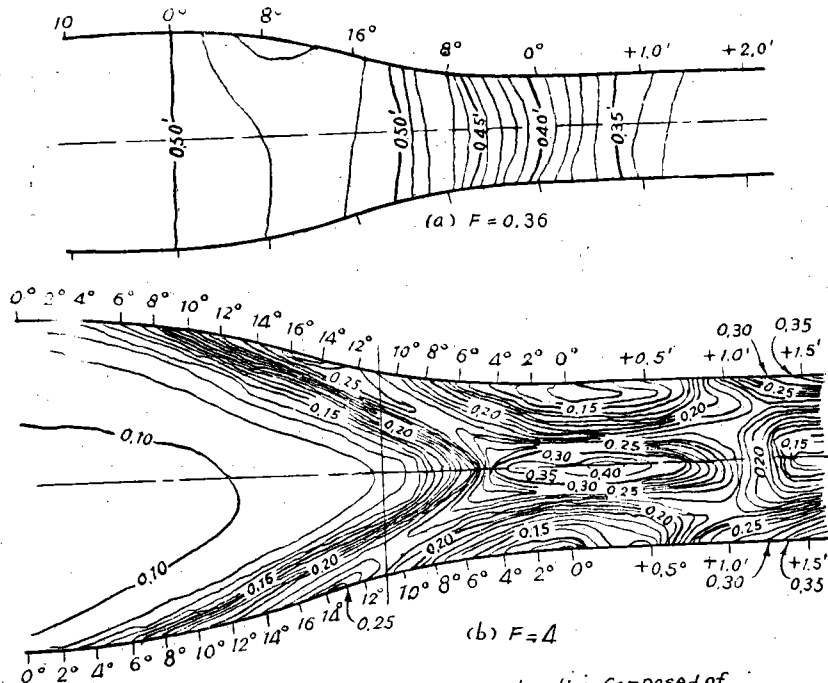


Fig. 37. - Contours of Water Surface in a Contraction Composed of Circular Arcs

關係없이 最高水位는 變하지 않는다.

(c) 境界層의 影響

Fig. 39에서 아나바와 같이 水位의 實測值과 理論值를 比較하면, 첫째로 實測水位는 理論水位보다 낮아지고 縮小水路의 入口에 있어서의 曲線보다 比較的 연하다.

둘째로는 實測值의 曲線의 頂點은 날카롭지 않고 둥글고 연한 曲線이 되어있다. 이理由는 壁에 沿한 境界層 때문에 流速分布가 0에서 平均流速까지 變化하므로 側壁의 角變化는 境界層外의 主流에 傳達되지 않고 Froude 數가 더 작은 範圍에서 이루어지기 때문이다. 따라서 水位上昇도 작고, 急激한 水位의 上昇은 境界層外에 흐름의 變化가 傳達될 때까지 늦어지는 것이다. 境界層의 影響은 작은 實驗裝置에 對해서는 相當히 크지만 實際의 水路에 있어서는 境界層의

두께가 수치수에 比較해서 작기때문에 理論에 가까운 값이 될것이라고 생각된다.

(d) 其他 形狀의 縮小斷面水路

前述한 圓弧로된 水路가 가장 좋은가 또는 좋지 않은가는 理論 및 Fig. 40에서 說明할수 있을 것이다. 지금 上流側의 Froude數 F_1 을 順次的으로 크게할때 Fig. 40에 表示된 것과 같은 各形狀의 水路(上流水路와 下流水路의 幅은 모다 같다)에 있어서 흐름의 狀態가 어떻게 變化하는가를 系統的으로 생각해보자.

Fig. 40에는 A, B, C의 같은 型式의 水路에 對하여 3種類의 Froude數 下에 생기는 攪亂波의 大略의 模樣이 表示되어 있다. Case 1의 A, B, C는 實用的意味가 적다. 이와같은 境遇는 대단히 긴 連絡水路가 必要한 것이다. A_1 및 B_1 의 境遇는 (+)의 攪亂波가 反對 側 壁面의 凸曲線에 부딪치게 되므로 C_1 의 境遇보다는 좋은 水路라 할수있다. 그리고 B_1 의 境遇는 (+)의 攪亂波가 한곳에 모이게

되므로 가장 強한 衝擊波가 생기는 것이다. A_1 및 C_1 의 境遇는 B_1 보다는 작지만 역시 相當한 衝擊波가 생긴다. Case 1의 境遇는 攪亂波가 서로 干涉하여 菱形의 波가 下流水路에 連續的으로 傳達하여 좋으나 一般적으로 긴 連絡水路가 必要하고 限界水深에 가까운 水深에 對應하는 큰 波角을 가지므로 現象은 計算에서 求한것과 같이 되지않는다.

Case 2의 A, B, C의 特色은 攪亂波의 交叉點은 Case 1보다 下流에서 생기고 주어진 Froude數와 適當한 길이 的 連絡水路에 對하여 許容할수있는 攪亂波高의 條件이 이와같은 波形을 만

드는 것이므로 “定常的인 Froude數”라고 되어 있다. C_2 는 曲線에 依한 波高의 低下의 影響이 下流까지 내려가있으므로 側壁에 沿한 最低水位는 攪亂波가 그로인한 最大 水深과 交叉하는 同一斷面에 있다. 따라서 下流水路에는 最大의

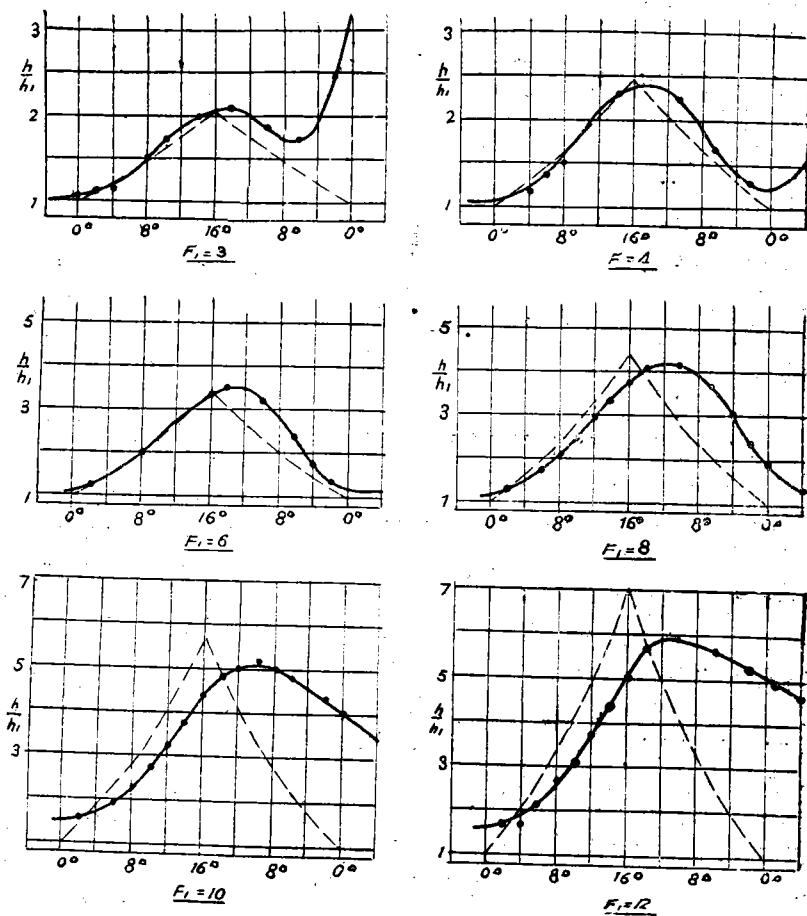


Fig. 39. - Measured And Theoretical Wall Profiles for Circular Wall Contraction

攪亂이 생기며 가장 좋지못한것이다. A_2 는 이와같은 現象이 약간 緩和되고 B_2 에 있어서는 (-)의 波가 攪亂의 交叉點 보다 上流에서 衝擊波線에 到達하므로 下流의 攪亂은 相當히 작아진다.

Case 3의 A, B, C는 모든 衝擊波가 下流의 直線部에 있으므로 最大의 攪亂을 주게된다. Froude數가 너무 큰것이므로 A_3, B_3 는 連絡水路가 너무 짧은것 같다. 그리고 凸曲線에서 생기는 (-)의 波에 依하여 앞서 說明한 두境遇보다는 peak가 약간 緩和되더라도 同一斷面附近에서 壁面과 中心線에서 最低水位와 最高水位가

생기므로 下流의 攪亂이 크게되는것이다.

以上, 說明한 9種의 例에서 B_2 가 가장 좋다. 그 理由는 中心線의 最高水位가 A_2 보다 높다 하더라도 攪亂波相互間의 干涉 때문에 下流水路에 있어서의 攪亂이 작아지기 때문이다. 따라서 이와같은 特性을 갖인 圓曲線을 使用하여 縮小部의 水路를 設計해야한다. 다음節에서 說明하는 系統的인 研究가 理論的으로 優秀한 水路設計에 도움이 될것이다.

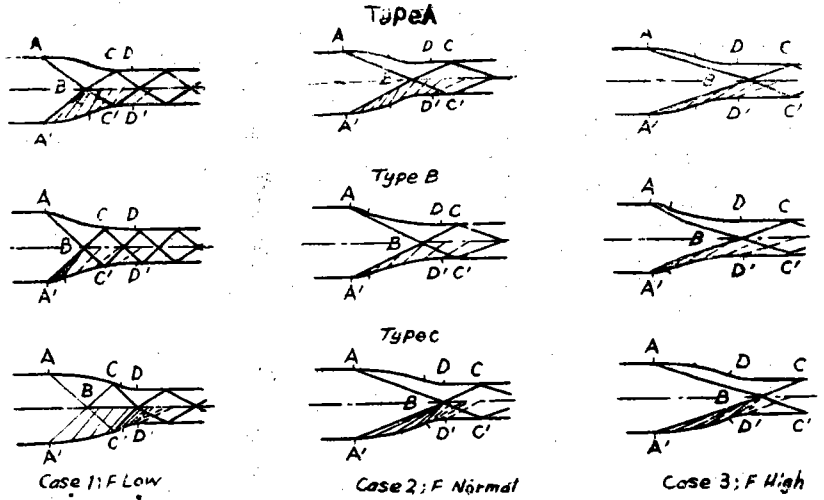


FIG. 40. - Contractions Composed of Circular Arcs Showing Schematic Disturbance Lines

N. 直線壁을 갖인 縮小斷面水路

(a) 設計原理

攪亂波高는 使用하는 曲線形에는 關係없이 全 偏倚角 θ 에만 關係하므로 θ 를 最小로 하는것이 合理的이다. θ 를 작게하려면 긴 直線部를 前記한 曲線部의 中間에 插入하면 좋다. 따라서 曲線部分의 曲率을 크게하고 긴 直線部를 中間에 插入하면 偏倚角이 작게되므로 最小의 θ 는 上流와 下流의 側壁을 直線으로서 連結하고 그交點을 多少 둥글하게 하면된다.

Fig. 41에 表示된 흐름에 있어서 各部分의 水位를 Froude數의 函數로 表示한것이 表-4이다. Fig.35의 水路에 對한 값도 同時에 記入되어 있다.

(表-4)

Froude數	$n=8^\circ$ 直線縮小			中心角=16° 圓弧曲線縮小		
	h_2/h_1	h_3/h_2	h_3/h_1	h_2/h_1	h_3/h_2	h_3/h_1
2	1,35	1,35	1,83	(1,82)	—	跳水
3	1,50	1,40	2,10	2,10	1,80	3,73
4	1,63	1,50	2,44	2,46	1,83	4,50
6	2,00	1,67	3,34	3,41	2,05	7,0
8	2,31	1,83	4,23	4,45	2,25	10,0
10	2,70	2,00	5,40	5,61	2,40	13,5

表-4에 있어서 h_2/h_1 및 h_3/h_1 은 中心角 16°의 圓弧水路와 角度가 8°인 直線으로된 水路의 各

部分의 水深의 比를 表示한다. 따라서 h_3/h_1 은 衝擊波의 最初의 交點으로부터 下流의 水位와 平水位와의 比이며 攪亂에 依해서 生길수있는 最高水位이다. Froude數의 큰값에 對한 h_3/h_1 의 값은 實用上 過大한 값이지만 여기에서는 比較하기 爲하여 記入한것이다.

이와같은 直線形의 縮小斷面水路의 設計方法은 簡單하며 다음과같이 한다 卽 上流側의 Froude數 F_1 및 許容할수있는 水位 h_2/h_1 이 決定되면 第1篇의 Fig.8에서 側壁의 中心線과 이루는 角 θ 및 F_2 가 決定된다.

Fig. 41에 있어서 AA'에서 生긴 衝擊波線은 中心 B에서 交叉한 다음 屈折하여 CC'에 到達한다. AB 및 A'B를 通過하는 派線은 θ 만큼 屈折하고 BC, BC'를 通過할때도 θ 만큼 屈折하며 F_2 를 알고 있으므로 다시 Fig. 8에서 h_3/h_2 , β_2 , F_3 등을 求할수있다. 一般的으로 h_3/h_1 의 값은 3보다 작겠끔 計算되어야한다. 實際問題로서 側壁의 角度는 작으므로 縮小部에서 側壁에 沿한 돌개번의 反射波는 生기지 않는다고 생각할수있다. 그러나 理論的으로는 이와같은 境遇도 역시 Fig. 8,에서 h_4/h_3 , F_4 등을 求할수있다.

(b) 下流水路에 있어서의 攪亂波形

縮小斷面水路에 直線形을 使用하여 攪亂을 제거하는것이 第一의 目的이라 한다면 다음에는 下流水路에 生기는 停止波를 減少시키는것이 第二의 目的이다. 一般的으로 Fig.41(a)와 같이

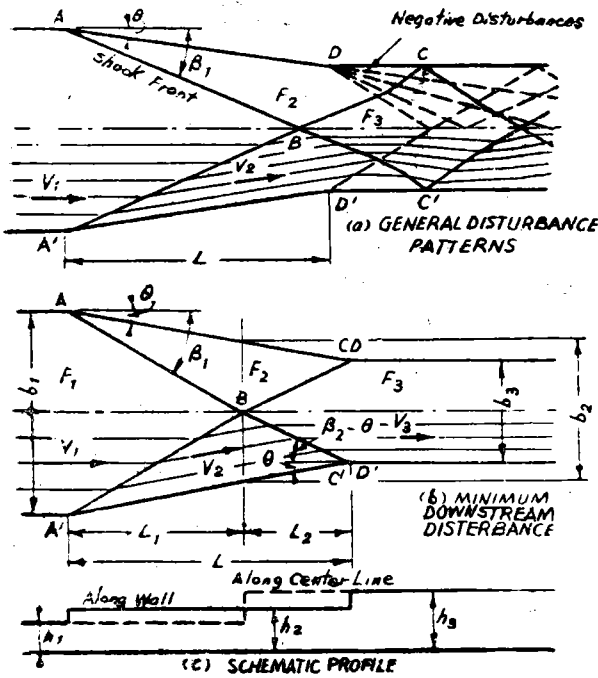


Fig. 41. - Design of straight-wall Contractions

BC, BC'의 충격波線은 D, D'에서 나가는(-)의攪亂을 받는다. 그리고 下流水路에 가장 많은攪亂을 주는 境遇는 B와 D D'가 同一斷面에 있을때이며 가장 적은攪亂은 CC'가 DD'와 一致하고 (+)의 충격波가 (-)의 충격波에 依해서 消去되는 境遇에 이른다. 이와같은 가장攪亂이 적은 設計는 S字型的 曲線水路에서는 容易하지 않으나 直線型水路에 있어서는 Fig 41(b)와 같이 幾何學的 條件과 水理學的 條件을 滿足시키면된다.

幾何學的 條件은 Fig. 41(b)에서

$$L=L_1+L_2=\frac{b_1}{2\tan\beta_1}+\frac{b_3}{2\tan(\beta_2-\theta)} \dots (36)$$

$$L=\frac{b_1-b_3}{2\tan\theta} \dots \dots \dots (37)$$

連續方程式에서

$$b_1 h_1 v_1 = b_3 h_3 v_3 = Q$$

$$\frac{b_1}{b_3} = \frac{h_3 v_3}{h_1 v_1} = \left(\frac{h_3}{h_1}\right)^{3/2} \frac{F_2}{F_1} \dots \dots \dots (38)$$

水理的 條件은 第一編에서 記述한 (15)~(18)式을 使用한다.

以上과 같이 理論的으로는 이들의 式에서 β_1 및 β_2 를 消去하여 設計에 必要한 量을 求하면 된다. 그러나 實察로 設計할때는 容易한일이 아

니며 不可能에 가깝다. 따라서 最初의 흐름의 狀態가 F_1 및 b_1 인 水路幅을 b_3 으로 하는 境遇는 다음 과 같이 한다. 처음에 要求하는 h_3/h_1 의 값을 假定하고 (33)式에 代入하여 F_3 의 값을 計算한다. F_3 가 1에 가깝지 않은 값을 取하고 Fig 8에서 h_2/h_1 및 F_2 의 값을 F_1 및 假定한 θ 를 使用하여 計算한다. 다시 h_3/h_2 및 F_3 의 값을 같은 θ 를 使用하여 計算한 結果 h_3/h_1 과 F_3 의 最初의 假定値와 一致할때까지 θ 의 假定을 變換시킨다. 이와같은 試算法에는 Fig. 8이 便利하다. θ 가 決定되면 縮小部의 水路의 길이는(36)式, (37)式에서 簡單히 求할수있다. 긴 縮小部는 一般的으로 h_3/h_1 의 값이 작고 큰 F_1 이 必要하다. 그리고 縮小部를 짧게 하려면 萬一 F_3 이 限界値보다 相當히 큰 값이면 h_3/h_1 은 2내지 3程度가 좋을것같다.

理論的 研究의 結果를 要約하면 다음과 같다.

- (1) 直線을 使用한 縮小斷面水路는 曲線을 使用한것보다 攪亂의 程度에서 보더라도. 또 水路長에서 보더라도 恒常 좋다.
- (2) 주어진 水路幅의 縮小에 對하여 下流側水路의 攪亂을 最小되게하는 水路壁과 中心線 사이의 角度 θ 가 決定된다.

(c) 鉛直加速度와 境界層의 影響

충격波線의 實際의 꼴은 基本理論에서 假定한 것과는 相當한 差異가 있으며 Fig. 42와 같다. 基本理論을 만들때는 첫째로 波線은 平面的으로 볼때 하나의 直線으로서 表示하고 縱方向 크기는 無視할만치 작다고 한것이다. 그리고 둘째는 流速分布는 全水深에 걸쳐서 一定하다고 한것이다.

그러나 水路의 周邊에 沿한 境界層때문에 周邊의 水面上昇과 低下에 影響을 주는것이다. 即 낮은 攪亂波에 있어서는 흐름이 緩하게 擴大되지만 높은 攪亂波에 있어서는 水面의 傾斜가 碎波의 狀態로된다. 그리고 跳水現象에 類似한 表面渦가 形成된다. 傾斜가 큰 波線은 큰 鉛直加速度가 생기므로 波線의 밑에 있어서는 靜水壓分布가 되지않는다.

이때문에 波線에 있어서는 部分的으로 計算値보다 水深이 크게되고 流線이 水路床에 平行으

로 됨에 따라水深은 理論值에 가까워진다. 이와같이 波線은 縱方向으로도 dimension을 갖는다. 鉛直方向에 攪亂이 생긴다는 事實은 實驗結果를 解析할때 考慮해야 한다. 그러나 波線의 縱方向의 dimension은 構造物全體에 比해서 작다고 할수있다.

攪亂波의 反射와 交叉의 現象도 역시 理論上的의 假定과 實際와의 物理的인 相違때문에 理論과는 다른 現象이 된다. Fig. 42에는 境界層이 點線으로서 表示되어 있다. 이 그림과같이 波線의 下部에 있어서는 境界層의 두께가 크게 되어있다. 그 理由는 境界層內의 流體가 가진 運動量이 작으므로 波線直下의 壓力의 逆勾配를 이겨나가지 못하기 때문이다. 이와같은 原因으로서 境界層의 displacement thickness가 變하고 마치 水路床이 높이된 것과 같은 現象이 생긴다. 이와같이 하여 水流의 比 energy가 減小하고 波高와 衝擊波線이 생기는 位置가 약간 變化하는 것이다.

(d) 直線壁을 갖인 縮小斷面水路의 實驗結果

直線壁을 갖인 縮小斷面水路에 關한 問題는 Lehigh 大學과 M. I. T에서 研究되었다. 最初에 MIT의 水理研究室에서 M. P. Barschdorf와 H. G. woodbury가 알루미늄製의 水路를 使用하여 側壁이 3°에서 30°까지 中心線과 傾斜하것끔 만들고 Froude 數가 3에서 4까지의 흐름에 對하여 水路壁의 角度를 變化시켜서 생기는 停止波를 側定하는 一連의 實驗을 行하였다.

各斷面의 形狀은 前節에서 論한 局部的影響과는 無關하게 波高와 波角을 求하는 Point gage를 써서 決定하였다.

Fig. 44에는 이 境遇의 Point gage에 依한 測定結果가 表示되어 있다. 波線附近에는 局部的 水位上昇이 있는것을 알수있다. 그러나 이와같은 局部的攪亂을 지나가면 側壁에 沿한 水位는 大略 一定하게 된다 側壁에 沿한 水位는, 그림의 左右에 그려져있다. 역시 側壁에 沿한 水深 h_2 는 一定하다는 것이 明白하다.

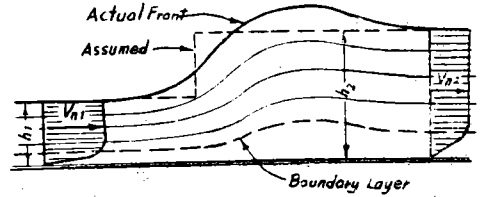


Fig. 42 - Schematic Comparison of Actual and Assumed Wave Front

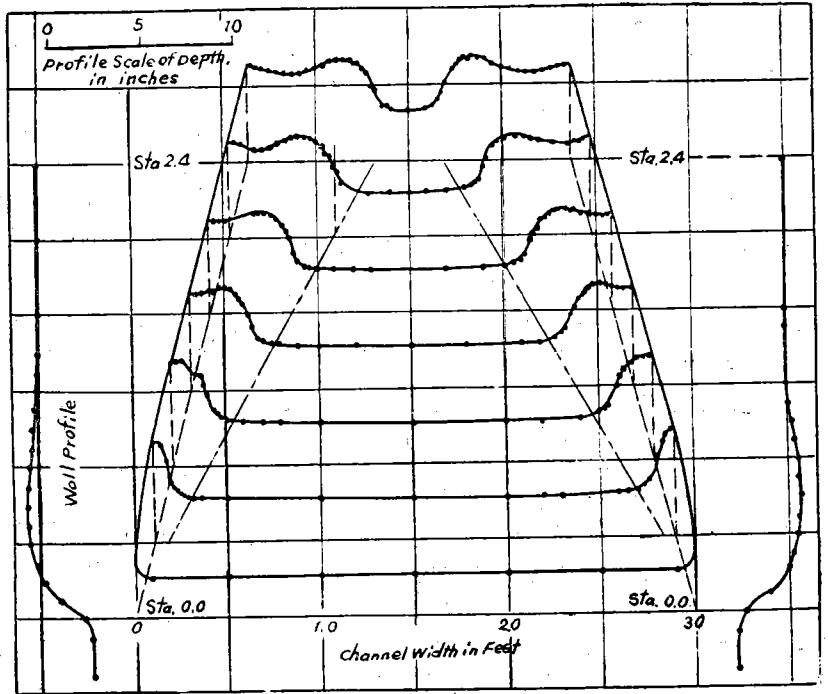


Fig. 44. - Surface Profiles of Standing Waves in Straight Wall Contraction; $F = 3.86$ And $\theta = 15^\circ$

表-5에는 波角 β_1 과 水深의 比 h_2/h_1 의 測定值과 理論值가 比較되어 있다 各斷面에 있는 測點의 垂直高를 求하고 各斷面에서 求한 波線의 位置를 直線으로서 連結하면 實測角 β_1 을 求할수있다.

(表-5)

側壁角	理論值		實測值		理論值와 實測值의 差	
	β_1	β_1	h_2/h_1	h_2/h_1	β_1	h_2/h_1
3°	17°-45'	15°-30'	1.21	1.24	-11.8%	2.3%
6	20-15	18-15	1.47	1.47	-9.9	0
9	23-10	22-45	1.70	1.73	-1.2	1.7
12	26-30	26-7	2.00	2.00	-1.5	0
15	29-30	29-55	2.22	2.22	+1.4	0
18	32-25	34-15	2.49	2.47	+5.6	-0.70
21	35-45	38-00	2.72	2.71	+6.3	-0.3
24	39-18	41-20	2.99	3.01	+5.2	+0.6

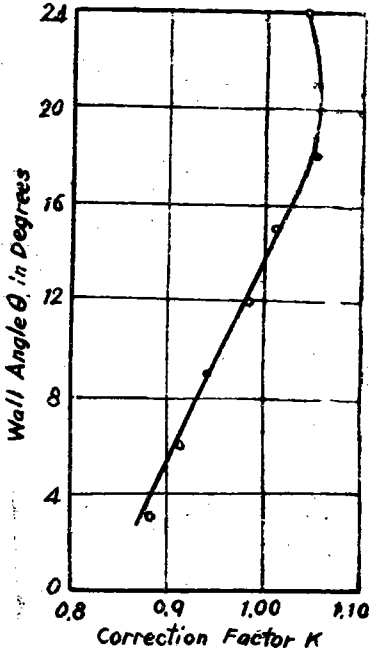


Fig. 45 - Plot of Correction Factor K Against Wall Angle θ

表-5에 依하면 h_2/h_1 의 값은 實測値와 理論値가 잘 一致하지만 β_1 은 大略 -12%에서 +15%의 誤差가 있다.

지금 表-5에서

$$K = \frac{\sin \beta_1 \text{의 實測値}}{\sin \beta_1 \text{의 理論値}} \dots \dots \dots (39)$$

라 놓고 K를 求하여 K 및 側壁과 中心線사이의 角度 θ 의 關係를 求하면 Fig. 45와 같이 된다. 이 그림에서 F가 大略 一定한 境遇의 理論과 實測値사이의 關係를 求할 수 있다. F=4까지의 흐름에 對한 것이므로 β_1 의 最小値는 Fig. 8에서 $15^\circ 10'$ 이며 K가 β_1 에 주는 波高의 影響은 h_2/h_1 이 작은 境遇 卽. θ 가 작은 境遇는 K는 1보다 작고 理論値가 實測値보다 크다. 그리고 h_2/h_1 이 2보다 큰 境遇는 K는 1보다 크게 되어 理論値보다 實測値가 크게 된다. 이와같은 事實은 鉛直加速度가 波線의 位置에 影響이 있다는 것을 說明한다. (Fig. 42參照)

이와같은 傾向은 Lehigh 大學에서 實驗한 結果에도 表示되어 있다. $\theta=6^\circ$ 로 固定시키고 F=3~10의 範圍에 對한 結果는 表-6에 要約되어 있다. h_2/h_1 은 測定値에서 容易하게 求할 수 있으나 β_1 의 測定資料에서는 求할 수 없고 多少 補間法에 依存하지 않으면 안 된다.

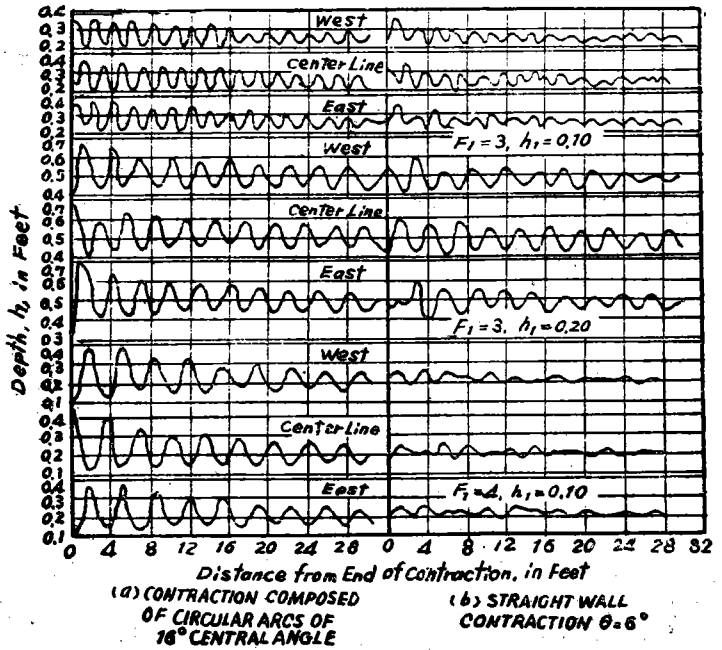


Fig. 46 - Well and Center-Line Profiles; $F=4$ And $h_1=0.10$

(表-6)

Froude 數	理論値 β_1	實測値 β_1	理論値 h_2/h_1	實測値 h_2/h_1
3.00	$25^\circ-10'$	$22^\circ-00'$	1.38	1.31
4.00	$19^\circ-30'$	$18^\circ-40'$	1.47	1.52
6.00	$15^\circ-00'$	$15^\circ-10'$	1.75	1.73
8.00	$12^\circ-20'$	$12^\circ-45'$	2.00	2.17
10.00	$11^\circ-10'$	$10^\circ-30'$	2.30	2.88

結論으로서 上述한 理論은 實驗室水路에 있어서 F=3~8 및 $h_2/h_1=1\sim3$ 에 對하여 實驗的 事實과 잘 一致하고 이 理論이 實際의 設計에 有效하다는 것은 前述한 것에서 明白하다.

(e) 下流水路의 擾亂形態

圓弧로서된 全偏倚角 16° 의 縮小水路에 있어서 이水路의 終點에서 下流測의 側壁 및 中心線에 沿한 水深이 Fig. 46(a)에 表示되어 있다. 이水路과 길이가 같은水路에 있어서 萬一直線壁을 使用한다면 $\theta=8^\circ$ 가 充分하지만 보다 작은 Froude 數에 對해서도 使用할 수 있겠끔 길이가 더 길고, $\theta=6^\circ$ 의 縮小斷面水路를 만들어서 側壁 및 中心線에 沿한 水深을 表示하는 것이 Fig. 46(b)이다. (그림 a와 같은 條件으로 흐르는 境遇)

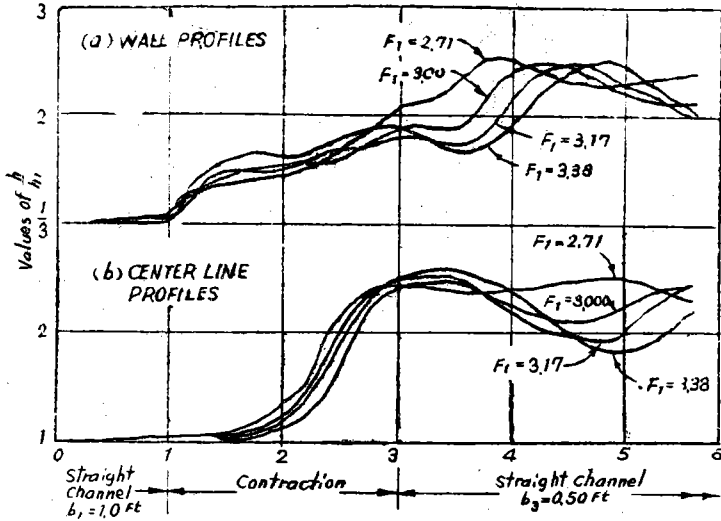


Fig. 47. - Wall and Center-Line Profiles For Straight-Wall Contraction: $\theta=6.9^\circ$

그림 (a)와 (b)를 比較할때, (b)가 波高에 對하여 좋은 設計라는것을 簡單히 알수있다. 그리고 (b)에 있어서 $F=4$ 의 境遇가 $F=3$ 의 境遇보다 攪亂이 적다는것을 알수있다. 이것은 $F=4$ 의 境遇가 Fig. 41(b)에 表示된것과 같은 正當한 設計條件을 더 많이 滿足하기 때문이다. 이에 反해서 $F=3$ 의 境遇는 波線의 交叉點과 反射點이 最大의 攪亂이 생기는 位置에 있는것이다. 이 研究에 앞서 D. P. Rodriguez 는 $F=4$, 水路幅의 比 $b_1/b_2=2$ 에 對하여 正確한 水路를 設計한바 $\theta=6.9^\circ$ 를 얻었다. Lehigh 大學의 片側 縮小斷面 水路에서 實驗한 結果에 依하면 가장 좋은 水面形은 $F=4$ 가 아니고 Fig. 47과 같이 $F=3$ 程度의 境遇라한다. 이와같은 結果는 豫期 못한 것이지만 그後의 實驗에 依하여 表-5와같은 實驗結果로부터 아는바와같이 이 程度의 Froude 數에 對하여 理論上의 波角 β_1 보다 實際의 波角이 작은 것이다. 따라서 理論上 正確한 水路를 만들더라도 實際의 波角이 작으니까 水路의 길이를 보다 길게 해야 하는것이다. 이와같은 事實에서

Coles 및 Shintaku 는 側壁角 6° 의 水路를 使用하여 $F=4$ 의 흐름에 對해서 Fig. 46(b)와 같은 좋은 水面을 얻을수 있었다.

縮小部의 常流 및 射流에 對한 水位等高線은 Fig. 49에 表示되어있다. 常流는 $F=0.315$ 이고 Fig. 37(a)의 側壁에 該當하는 것이고 射流는 $F=4$ 이며 Fig. 37(b)에 該當하는 것이다.

V. 結 論

第三篇에서 記述한 實驗의 根據에서 基本理論이 一般的인 問題를 取扱할때 信賴注이 있다는것을 斷定할수는 없다. 그러나 基本的인 現象은 大略 이理論에서 推察할 수있다. 그리고 이理論에는 包含되지않은 重力과 摩擽의 影響 또는 波線直下의 鉛直加速度의 影響이 있으므로 약간의 補正이 必要할것이다. 이와같은 影響의

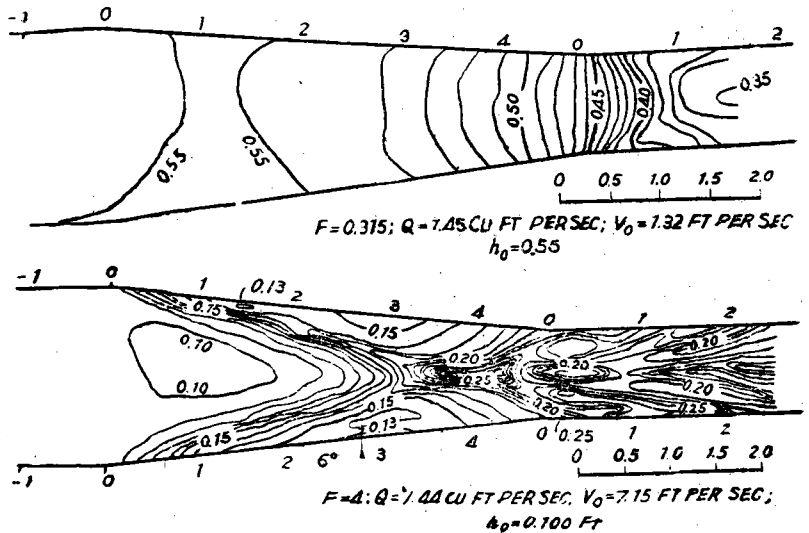


Fig. 49. - Contours of water surface in a straight-wall contraction from 2 ft to 1 ft.

系統的인 研究는 앞으로 繼續될것이다. 本論文에서 記述한 研究를 要約하면 다음과 같다. (a) 圓弧로된 典型的인 縮小斷面水路의 現象을 넓은 範圍의 Froude 數에 對하여 實驗的으로 研究한 것이다.

(b) 理論値와 實測値의 比較를 한것이다.

(c) 이들의 結果에 依하여 縮小斷面水路內의 射流의 物理的性質은 常流의 性質과는 다르다는 것을 斷定한것이다.

(d) 射流現象에 對하여 攪亂과 下流水路內의 攪亂을 減少시키기 爲한 基礎的 研究을 한것이다.

(e) 典型的인 直線型縮小斷面水路의 實驗을 하고 이것이 本質的으로 射流의 條件에 適合하다는 것을 알았다.

以上과같이 射流에 對한 縮小斷面水路에 있어서 側壁과 中心線사이의 角度와 주어진 水路幅의 比에 對하여 縮小部分의 長이를 適當히 擇함으로써 停止波를 避하는 設計를 할수있는 것이다. 그리고 水路末의 方向이 水流의 方向과 一致한다면 直線壁의 水路가 曲線壁의 水路보다 좋은것이다.

이論文에 있어서는 水路床의 勾配가 變化하는 境遇는 研究하지 않았다. 이와같은 境遇도 역시 本論文과 같은 方法으로서 實驗的으로 研究할수 있을것이다. 그러나 이와같은 內題는 實驗的 및 理論的인 擴張이 必要할것이다.

第四篇 幅이 擴大하는 水路의 設計

I. 要 旨

幅이 擴大하는 水路內의 射流에 對하여 一般的으로 記述하고 다음과 같은 三個項目에 對하여 水路의 設計事項을 論議하고있다.

- (1) 幅이 急히 擴大하는 境遇의 水面形狀
- (2) 擴大하는 水路에 使用할수있는 有効한 曲率
- (3) 擴大하는 水路의 末端에 생기는 攪亂의 消去

그리고 初等的 波動理論과 實測値와의 比較와 그結果를 計算과 豫備設計에 對하여 便利하겠끔 一般的인 計算圖表의 形式으로 表示하였다.

II. 序 論

管水路, Sluice gate 등에서 流出하는 흐름 또는 餘水吐, 急勾配의 Chute 등을 흐르는 高速度 水流에 橫方向의 擴大를 附與하는 境遇, 萬一 水路의 擴大가 너무 急하면 水流의 大部分을 境界에 沿해서 흐를수없고 그리고 萬一 너무 緩한 擴大이면 水路에 必要한 材料에 不經濟性이 생긴다 그리고 또 萬一 擴大部分에 不合理的 境界

를 使用한다면 그點 또는 그의 下流에 있어서 部分的인 攪亂이 發生해서 水路의 側壁을 물이 넘치게 된다.

이와같은 水流의 特征은 模型實驗에서 研究하는 것이므로 個別的인 模型의 形狀에 對해서 만이 詳細히 알수있다. 一般的인 問題의 解析은 아직 不可能하지만 本論文에 있어서는 波動理論을 使用하여 넓은 範圍의 境界條件에 對한 近似解를 求하고 몇가지 變數間의 一般的인 關係를 求할수 있었다.

一定하지않은 斷面을 갖인 開水路의 定常流와 水路의 斷面擴大에 依한 流速 및 水深의 變化는 水路의 幾何學的條件 및 流量 그리고 流體의 性質에 支配된다. 이와같은 要素中 水路의 幾何學的條件은 水路의 側壁의 形狀 水路의 底面 勾配, 및 形狀 그리고 側壁 및 바닥의 粗度 등을 생각할수 있다. 流體의 性質에 對해서는 嚴密히 말하면 密度, 比重, 粘性 및 表面張力 등을 생각할수 있다. 그러나 極히 작은 模型以外는 表面張力과 粘性은 그다지 重要性이 없고 나머지 두개의 量도 그들의 比 $\frac{\tau}{\rho} = g$ 即 重力의 加速度으로써 表示

된다. 萬一 이들의 獨立變數를 兀定理로서 整理하면 無次元量인 Froude數와 境界의 幾何學的인 比를 表示하는 長이의 比를 얻을수있다. 이와같은 境遇 주어진 境界條件에 對한 自由表面의 相對的形狀 및 流速分布는 單純히 Froude數의 支配를 받게된다 $T=1$ 의 限界値를 境界로 하여 水流의 狀態가 變化하는것은 前述한바와 같다.

幅이 擴大하는 水路를 從來와같이 不等流의 方程式을 푸는問題로 取扱하는것은 曲線部의 起點 및 終點에 있어서 底面 側壁 등의 急變이 있는 限 흐름에 亂攪이 있으므로 不可能하다. 即 幅全體에 對한 平均流速이든가 平均水深에 對하여 풀드라도 意味가 없는것이다. Froude數가 1보다 작은 境遇는 管의 擴大部에 對한 方法과 같이 하여 水路의 形狀을 設計할수있고 流線의 形狀도 求할수있는것이다. Froude數가 1보다큰 境遇는 設計 및 計算은 重力波의 解析과 같다.

第一篇에서 說明한바와같이 다음과같은 條件이 滿足되면 주어진 境界에 對한 流線의 形狀, 水面等高線 등을 圖解的으로 求할수있다.

- (1) 水路壁이 鉛直이고 바닥이 水平인 境遇
- (2) 境界面의 摩擦을 無視하는 境遇

開水路內의 高速度 흐름

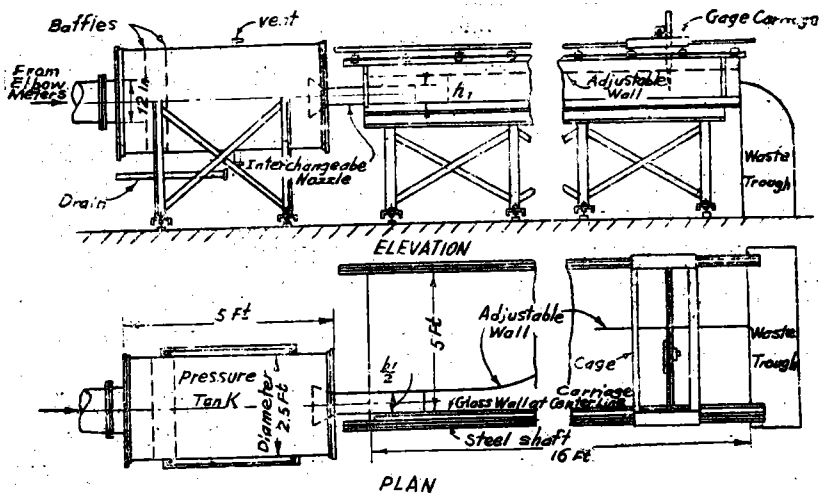


Fig. 50. - Schematic Representation of Experimental Apparatus

- (1) 水平水路床에서 擴大하는 高速噴流의 特性
 - (2) 擴大部에 있어서의 曲線境界의 影響
 - (3) 水路終端에서 等流로 復歸할때의 現象
- 全實驗은 the Engineering Foundation and Committee of the Hydraulic Division, A SCE, on Hydraulic Research의 後援下에서 Iowa 大學의 水理 實驗

(3) 水壓이 靜水壓分布인 境遇 이와같은 條件을 比較的 잘 測 定한다고 볼수있다. 그러나 水路의 始點과 終點에 比較的 急한 曲線이 있는 境遇는 水壓은 靜水壓分布가 되지 않는 領域이 存在하지만 適切한 緩和曲線을 挿入하면 效果의으로 이와같은 領域을 만들수있다. 實際的으로 均衡이 잡힌 擴大水路를 設計할때 圖解法을 應用하는데 있어서 不便한 要素가 두 개있다. 卽

- (1) 境界條件을 먼저 알고있어야만 圖解法을 應用할수있으므로 가장좋은 水路를 決定하기 爲하여 圖解法을 反復해야한다.
- (2) 水路의 終端에는 一般的으로 跳水가 생기지만 이와같은 方法으로써는 跳水現象에 對한 安全性을 알수없다.

下流水位의 背水에 依하여 생기는 跳水의 位置는 擴大水路와 下流水路와의 遷移部에서 傾斜 方向으로 波線을 갖인 跳水波形을 가진다는것은 經驗上 알고있으나 이와같은 現象에 對해서는 解明되지 않은問題이다.

本論文의 目的은 水路構造物의 設計에 關한詳細한 知識을 準備하는것보다 一般的인 現象을 取扱하는데 있으므로 理論과 實驗의 一致가 滿足할만하면 이들의 資料를 몇개의 圖表에 그려서 이 圖表에서 設計細目이 決定되겠끔 한것이다.

實驗結果의 一般化에는 다음의 3項目으로 나누어서 생각한다.

室에서 實施된것이다. 裝置의 大略은 Fig 50에 表示되어있다.

물은 高水槽에서 Elbow meter를 包含하는 4 inch 및 3inch의 管을 通해서 直徑 2.5ft 길이 5 ft의 壓力水槽에 供給된다. 壓力水頭의 一部에는 縱, 橫 0.4ft x 0.4ft, 0.3ft x 0.6ft, 및 0.25ft x 0.1ft 卽 邊의比가 1, 2 및 4의 3種類의 交換할 수있는 矩形斷面의 Nozzle가 있다 이 Nozzle에서 流出하는 流量은 Froude數를 1에서 8까지 출수있겠끔 되어있다.

III. 急擴大水路의 흐름의 特性

水路의 擴大가 極端인 境遇는 側壁이 갑자기 없어지고 幅이 無限大가 될때이며 이때의 水路床은 같은 勾配이다 h_1 및 V_1 을 上流側의 水深 및 平均流速이라고 하고 b_1 을 上流側의 幅, x, y 를 各水路의 出口 및 中心線에서의 距離라한다. 그리고 x 및 y 點의 水深을 h 라한다.

萬一 重力以外의 影響이 없다고하면 이들의

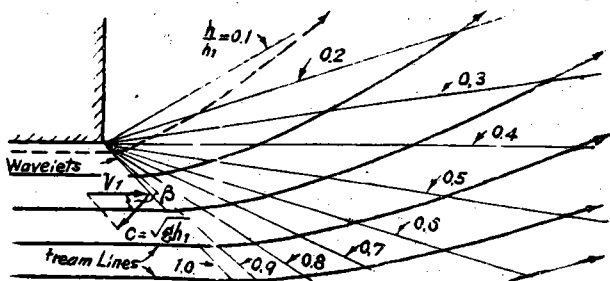


Fig. 51 - Pattern of Flow Near The Abrupt End of a channel Wall

變數는 다음과같은 次元이 없는 關係式으로 統合된다.

$$\frac{h}{h_1} = f_1\left(\frac{x}{h_1}, \frac{y}{h_1}, \frac{b_1}{h_1}, F_1\right) \dots \dots (40)$$

이 關係式이 成立되려면 모든點에 있어서 靜水壓分布, 卽鉛直加速度가 없어야 하지만 水路가

急激히 擴大하는 部分에는 이와같은 條件이 滿足되지 않는다. 그러므로 理論과 實際는 다를것이고 그 影響은 $\frac{b_1}{h_1}$ 의 支配를 받는다. 卽幅이 넓고 얇은 水路에 있어서는 理論과 實際는 잘 一致하지만 幅이 작고 깊은 水路에 있어서는 壓力分布는 靜水分布가 되지않는다.

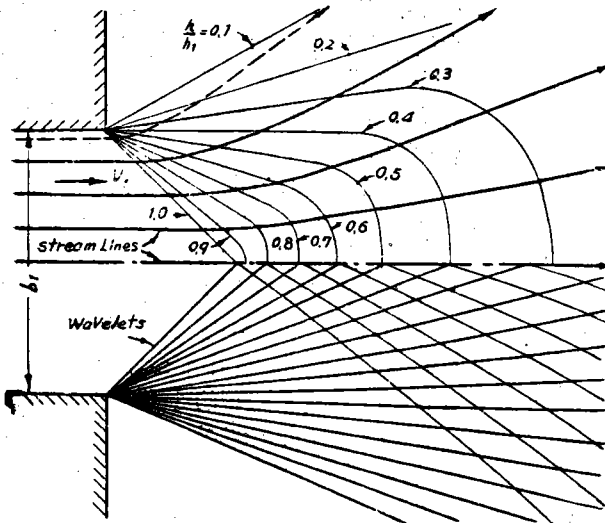
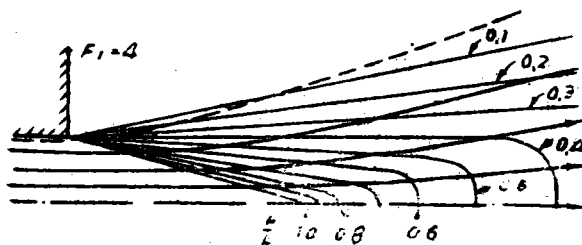
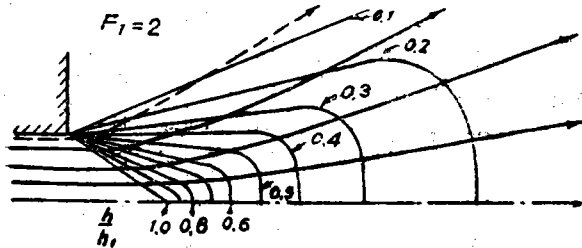
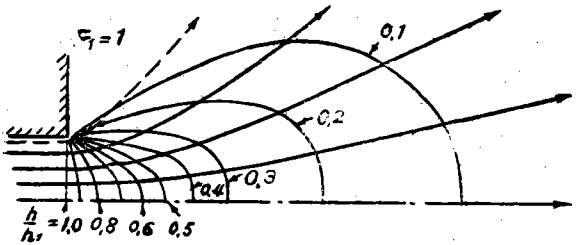


FIG. 52.- Effect of Wave Interference From Opposite Side of Channel



한쪽側壁의 急擴大에 依한 흐름의 狀態는 Fig.51에 表示되어있다 이그림에 있어서 最初의 攪亂波의 角은 $\beta = \sin^{-1} \sqrt{gh_1} / V_1 = \sin^{-1} \frac{1}{F_1}$ 이며 波線을 通過할 때에는 流線이 漸次的으로 꾸부러진다.

양쪽의 側壁이 急擴大하는 境遇는 Fig. 52와 같이 攪亂波가 서로 交叉하게된다, 攪亂波의 交叉 및 流線等은 第一篇의 基礎理論을 使用하여 明白히 할수있다. 各種의 F_1 에 對한 圖解法이 Fig. 53에 表示되어 있다.

$\frac{b_1}{h_1}$ 의 比에 따라 理論과 實際의 偏差가 얼마나 되는가를 表示하기 爲하여 Fig.53과 같은 Froude數를 使用한 세가지의 $\frac{b_1}{h_1}$ 에 對하여 水位等高線을 實測한 結果가 Fig54에 表示되어있다. Fig. 54에서 $\frac{b_1}{h_1}$ 에 依한 偏差는 相當히 크지만 Froude數에 依한 偏差에 比較하면 二次的인 것이라 생각된다. 卽 이와같이 求한 水位等高線이라 할지라도 그 平均値를 使用하면 豫備設計에 對해서는 充分하다고 생각된다.

各種의 生길수있는 흐름狀態를 迅速히 알코자할때는 Froude數의 다른 Parameter와 連結시켜 놓으면 便利하다. 어떤 하나의 等高線을 생각하여 Fig.54에 있어서의 側壁(水路의 假想中心線)과 交叉하는點을 F_1 에 對하여 對數圖表로서 表示하면 F_1 이 작은 곳을 除外하고는 大略 F_1 의 一次函數로서 表示할수있다. 換言하면 $\frac{x}{b_1}$ 을 F_1 로서 나눈값은 모든 Froude數에 對하여 같은 等高線을 重複시키는 傾向이 있어야 한다. 特性曲線法에 있어서는 (40)式을

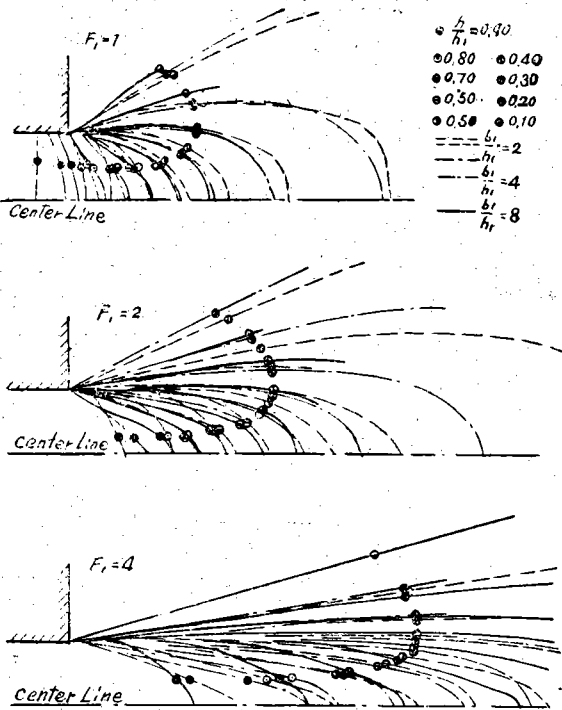


Fig. 52. - Experimental Measurements of Surface Configuration for Various Froude Numbers And Width-Depth Ratios

$$\frac{h}{h_1} = f_2 \left(\frac{x}{b_1}, \frac{y}{b_1}, F_1 \right) \dots \dots (41)$$

로 그變數를 減少시키고있다. 그러므로(40)式과 (41)式은 다음과 같이된다.

$$\frac{h}{h_1} = f_3 \left(\frac{x}{b_1 F_1}, \frac{y}{b_1}, \dots \right) \dots \dots (42)$$

이로써 實驗値를 整理하는 一般的方法을 얻었으며 水位等高線은 Fig. 55와같다. 이 그림에서 아는바와같이 Fig. 54에있어서의 水位等高線의 偏差는 크지않다. 이그림에서 다시 平均하여 求한 水位等高線은 多數의 平均 値를 다시 平均한 값이지만 F_1 및 b_1/h_1 을 使用한 21個의 實測等高線의 偏差는 充分히 작다.

IV. 擴大水路에 使用할 曲線形

水路의 擴大角이 $\theta = \tan^{-1} \frac{1}{6} \sim \tan^{-1} \frac{1}{9}$ 인 境遇射流가 흐르는 擴大水路의 設計에는 水深 및 流速과는 關係없이 一定한 法則이 存在한다. 即 前述한바와 같이 流線의 擴大角은 $x/b_1 F_1$ 의 값에 따라 變化한다. 그리고 流線은 모든 境遇에 있어서 比較의 一定하게 擴大해진다 萬一 一定하게 擴大하는 水路를 만든다면 斷面이 急히 擴大하는

點에 있어서는 흐름은 갑자기 方向을 變化하지 못하므로 流線의 局部的인 脫離가 생기고 (-)의 衝擊波가 集中하여 생기는 것이다. 그리고 擴大水路의 下流에서는 Froude 數가 다르고 흐름은 水路의 擴大보다 심하게 擴大하려하고 側壁에 부딪치게되어 (+)의 衝擊波가 생긴다. 그러므로 特性曲線法에서 求한 Fig. 56의 水位等高線과 같이 起點 및 終點의 Froude 數가 Fig. 56의 第2圖에 表示된것 만큼 크지 않으면 恒常 效率이 좋지못하다.

그러므로 擴大水路는 連續的으로 變化하는 曲率을 가지는 同時에 各 Froude 數에 따라 適當한 擴大를 해야한다. 따라서 水路를 豫備設計할때 가장좋은 曲線形을 求할려면 Fig. 55와 같은 一般圖를 求할 必要가 있다. 即 Fig. 55에 있어서 全流量의 90%를 包含하는 流線을 近似的인 代數式으로 表示하여 그것으로써 水路의 曲線形으로한다.

이와같이하면 曲線形은 다음式으로서 表示된다.

$$\frac{y}{b_1} = \frac{1}{2} \left(\frac{x}{b_1 F_1} \right)^{\frac{2}{3}} + \frac{1}{2} \dots \dots (43)$$

Fig. 57에는 (43)式으로서 表示되는 曲線壁에 對하여 b_1/h_1 의 平均値와 $\frac{x}{b_1 F_1}$ 의 값에 對한 水位等高線을 Fig. 55와 같은 方法으로 表示되어 있다.

이 그림에서 보는바와 같이 直線水路에서 擴大水路로 되는點에는 充分히 緩한 曲線이므로 靜水壓分布에 가깝고 따라서 b_1/h_1 은 本質的으로 變數로 생각할 必要가 없게되었다. 그리고 曲線은 漸次的으로 擴大하므로 (+)의 衝擊波가 생기지않고 流水斷面積에 比해서 水深이 크게 變化 하지않게 擴大하는 것이다.

近似的인 基準으로서 曲線壁에 圓弧를 使用하더라도 側壁의 水位變化는 中心線의 30%를 超過하지않는다. 勿論 이와같은 水位變化는 水路의 擴大率을 작게하면 即 (43)式의 係數를 減小시키면 작게할수있다. 그러나 주어진 水路幅에 對한 擴大率을 얻기 爲해서는 보다 길고 費用이 많이 드는 擴大水路를 만드는 結果가된다. 許容할수있는 水位의 變化를 決定하는것은 各自의 判斷과 水路出口의 條件에 따르지만 Fig. 55의

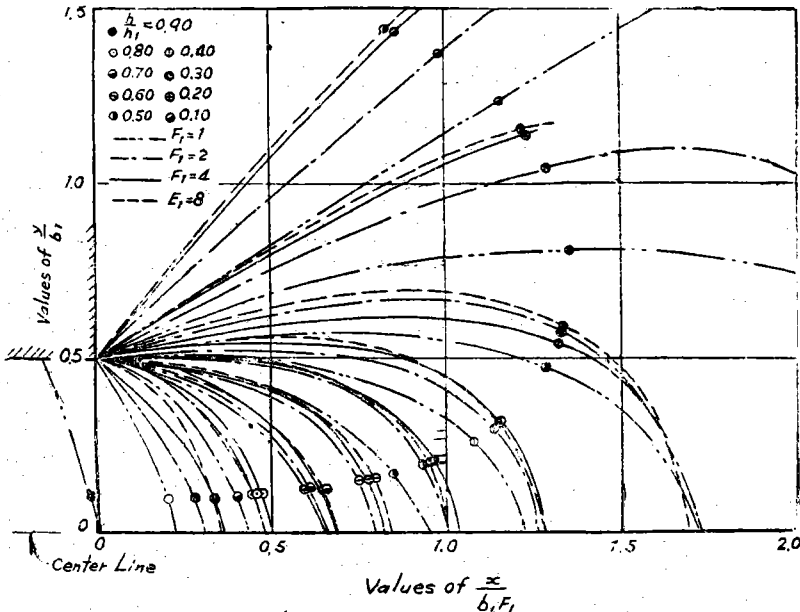


Fig. 55 - Generalization of Experimental Data For Abrupt Expansions

曲線이 擴大水路의 設計에 滿足할만한 根據가 될 것이라고 생각된다.

Fig. 55의 曲線은 各種의 Froude數 및 b_1/h_1 의 값에 對하여 實驗的으로 求한 흐름의 特性을 表示하는 것이며 特性曲線法에 依하여 換算된 것이다. 兩者는 一般的으로는 잘 一致하고 있으나 h_1/h_2 의 實驗值가 0~35°의 範圍內에서 下流側에 가깝게 되어있다. 이것은 境界層의 摩擦抵抗을 생각하지 않았기 때문이다. 같은 測定을 4~10%의 底面勾配에 對하여 되풀이한 結果 縱方向의 水位等高線의 誤差는 없었으나 橫方向의 誤差가 많았다 이것은 最大水路勾配가 各流線의 方向과 一致하지 않고 縱方向으로 되어있기 때문이다. 이와같이 생각하면 水平床에 對한 Fig. 57의 側壁曲線 및 水位等高線은 普通의 設計에 많이 使用되는 4~10%程度의 傾斜水路에도 應用할수 있다.

急勾配의 水路의 境遇는 흐름의 大部分이 最大底面勾配의 方向 卽 水路의 中心線에 平行으로 흐르는것을 防止하기爲하여 中央의 바닥을 높일 必要가 있다.

現在 바닥의 높이를 여러가지로 變化시켜서 좋은 結果를 얻고있다. 水路바닥을 높이는 境遇는 Fig. 57의 水位等高線과 흐름이 一致하게끔 底面勾配를 만들어서 橫斷方向의 水位 및 單位斷面積當의 流量을 等分配시키면 좋다. 다시말하

면 처음에 水平인 底面을 漸次的으로 中心線에 沿해서 높이고 側壁에 沿해서 낮게해서 各流水斷面에 있어서 먼저指定한 水位變化에 一致하게끔 한다. 流量과 水位를 同時에 滿足시킬수는 없으나 흐름의 狀態를 約 50%程度 改善할수는 있을것이다.

이와같은 部分的인 改善方法은 여러가지의 實驗이 必要없음으로 費用만 있으면 推獎할만한 일이다.

V. 水路의 下流端에 生기는 攪亂의 消去

射流의 解析은 超音速의 氣體의 흐름의 解析에 대단히 類似하므로 射流가 흐르는 擴大水路는 本質的으로 超音速風筒의 噴出口와 같은 條件이 必要하다. 卽 流速과 水深이 擴大部의 終端面에 있어서 等分布가 되겠끔 擴大部의 斷面을 變化시켜야 한다.

起音速風筒에 있어서의 이와같은 要求는 確實이 흐름의 狀態가 任意로 制御되는 것이지만 開水路의 擴大部보다 훨씬 嚴密하다. 實際로는 各流速에 따라 風筒의 噴出口의 壁面曲率을 詳細하게 變化시켜야한다. 그러나 以下記述하는 實際의인 制限만 없으면 風筒의 噴出口의 斷面設計의 基本法測을 擴大水路에서 一般的으로 應用할수 있다. 制限의 第一은 여러가지의 條件下에서 Froude數가 相當한 範圍內에서 變化하는것을 豫想해야 한다는것. 第二는 Froude數가 큰 흐름 및 水路幅의 擴大率이 큰 境遇에 對해서는 擴大水路의 길이 길게되어 建設費가 많다는것. 第三은 이와같은 斷面變化로써는 跳水現象을 安定시키는 方法이 없다는 것 等이다.

그러나 擴大部分이 連續曲線의 水路이고 幅의 增加를 適當히 하고싶은 境遇는 萬一 風筒과 같은 設計를 한다면 어느特別한 Froude數에 對하여 有効한 設計를 적어도 第一近似值로써 할수 있다. Fig. 58과 같이 設計의 基本方針은 凸曲線의 部分에서 生기는 (一)의 攪亂波를 다음의 凹

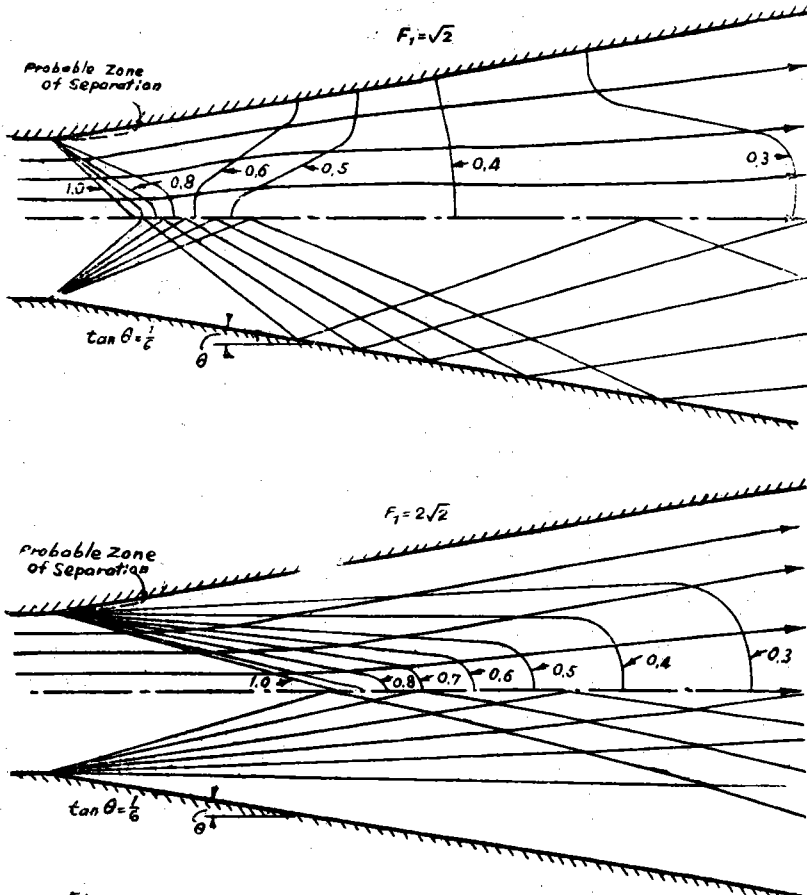


Fig. 55. - Patterns of Flow in a Uniformly Divergent Channel of Different Froude Numbers

- (1) 本 그림의 目的은 여러가지의 條件에서 求한結果를 一般的으로 表示하는데 있으므로 各曲線은 여러개의 Froude數에 對한 平均値를 表示하는 것이다.
- (2) 처음의 凸曲線은 $y/b_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{x}{b_1 F_1} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{1}{2}$ 의 曲線을 使用한것이므로 어떤 境遇는 보다 짧은 曲線形이 求해질지 모른다.
- (3) 擴大部의 길이는 全損失水頭로 無視할수 있을만큼 짧은 것이 아니므로 損失을 零이라 하고 特性曲線法을 應用하면 水路의 終端에서 實際로 생기는 水深보다 이 方法에서

曲線의 各部分에서 생기는 (+)의 攪亂波로써 干涉시켜서 相殺 시키겠끔 側壁의 曲線을 求하는 것이다. 그러나 이 方法은 不幸하게도 試算法이며 擴大率을 正確히 豫知할수는 없다.

이와같은 不便을 없애기 爲하여 各種 側壁의 一般의인 曲線을 水路幅의 擴大率을 變數로하여 Fig. 59에 表示한것이다. 이들의 曲線은 豫備設計의 한 指針程度 밖에 되지 않는다. 그 理由는 다음과 같다.

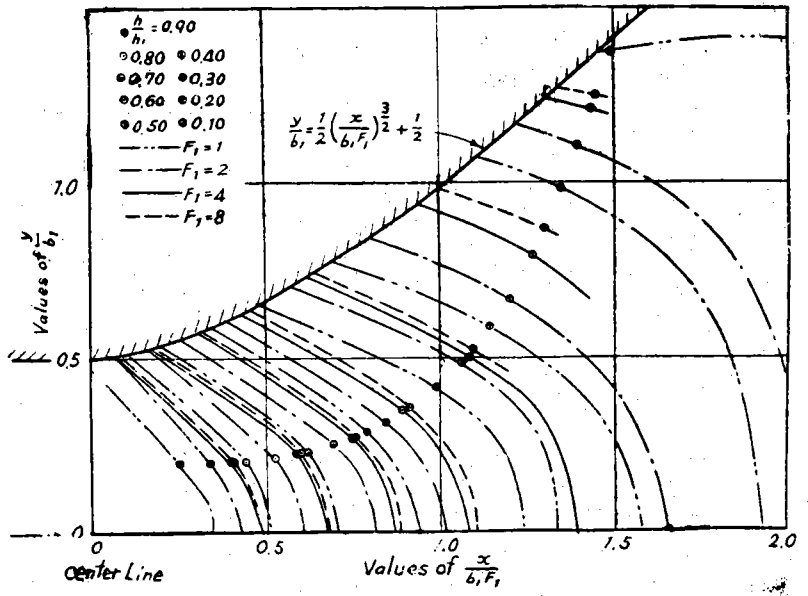


Fig. 57. - Generalization of Experimental Data For Gradual Expansions

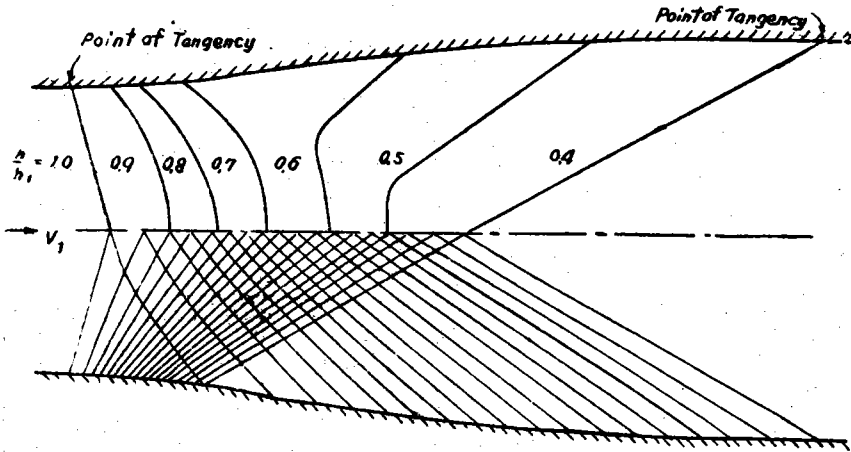


Fig. 58. - Design of an Expansion With Uniform Outflow For $F_1 = 2$ By The Method of Characteristics

가진 水路에 들어가는 地點의 水路床을 깊게할 必要가 있다. 그깊이는 擴大水路로 나갈때의 水流의 Froude數의 支配를 받게된다.

Fig.60을 參照하여 跳水現象에 對하여 運動量方程式과 連續方程式에서 Froude數, 跳水前後의 相對的關係 및 下流의 水路의 깊이 Z의 關係式을 求할

求한 水深이 相當히 작게된다. 例로써 Fig.59를 基準으로한 實驗水路의 水深은 波動理論에서 求한水深 보다 20~40%크다 萬一 跳水現象이 생기기前에 Froude數를 減少시키려면 水路의 擴大部의 길이를 Fig.57에 表示한것보다 짧게 하면된다. 그리고 萬一 擴大水路의 下流部가 急히 또는 漸次的으로 平行側壁의 水路로 變한다고 하면 (+)의 衝擊波가 各 接合部에 생겨서 흐름을 橫斷하게된다. 이와같은 波動은 萬一 跳水現象이 생기지 않으면 몇번이나 反射하여 下流에 傳達된다. 萬一 跳水가 생긴다 하더라도 그位置가 擴大部의 末端에 있던가 그附近에 있으면 前逝한 波動은 생기지 않지만 代身 跳水의 位置가 조금이라도 水路內에 있으면 水深이 작은곳으로 跳水가 前進하게된다. 卽 擴大部의 흐름이 對稱이 아니면 한쪽의 側壁에 沿해서 흐름의 大部分이 屈折하고 다른 쪽의 側壁에 沿해서 跳水가 擴大部의 上流端 까지 到達하게된다.

수있다.

Fig.60(b)와 같은 停止波가 생기는 水深보다 下流側의 水深이 작던가 또는 크던가에 따라 두개의 다른型式의 跳水가 생긴다. Fig.60(a)와 같은 條件에 있어서는 바닥이 깊은面에 있어서의 水壓은 上流側의 壓力에 依하여 決定되고 Fig.60(c)에 있어서는 下流側의 水位에 依하여 決定된다. (a) 및 (c)에 對한 關係式은 다음과 같다.

$$F_1^2 = \frac{1}{2} \frac{h_2/h_1}{1-h_2/h_1} \left[\left(\frac{z}{h_1} + 1 \right)^2 - \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^2 \right] \dots\dots(44a)$$

$$F_1^2 = \frac{1}{2} \frac{h_2/h_1}{1-h_2/h_1} \left[1 - \left(\frac{h_2}{h_1} - \frac{z}{h_1} \right)^2 \right] \dots\dots(44c)$$

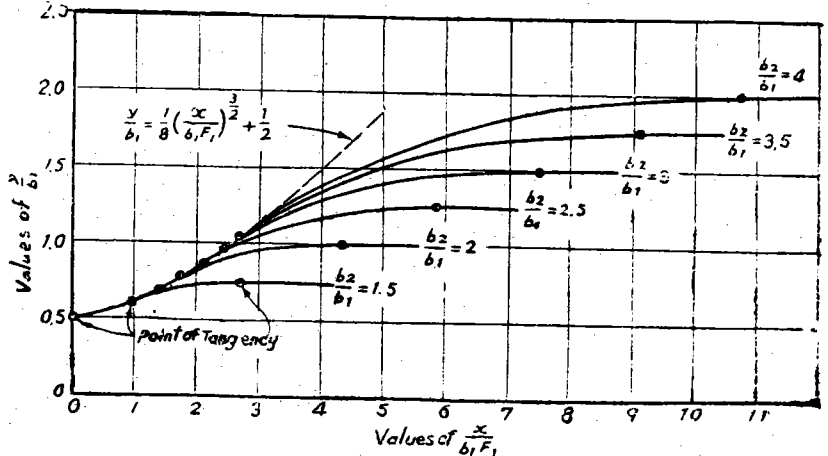


Fig. 59. - Generalization of Boundary Curves Determined by The Method of Characteristics

이와같은 境遇의 흐름은 대단히 심한 性質을 갖고있으며 境遇에 따라서는 接合部에서 溢流할때도 있고 또는 水路床을 洗掘할때도 있을것이다. 이와같은 跳水을 安定시키기 依해서는 平行壁을

水路末의 높이 Z 를 Parameter로 하고 (44)式에서 h_2/h_1 및 F_1 의 關係를 圖示하면 Fig 61와 같다.

그림에 있어서 오른쪽의 曲線은 (44.a)式에 對應하고 왼쪽에 曲線은 (44.c)式에 對應하는것이다.

Fig. 60 (b)에 表示된 停止波의 限界領域은 이式에서 豫知할수없다. 따라서 測定值에 依하여 알수밖 에 없다.

水路末이 갑자기 깊어진 境遇 또는 傾斜지게 깊어진 境遇에 對하여 實驗한 結果가 Fig 61에 plot되어있다. 이것은 上記한 近似解가 正當하다는것을 表示하는 同時에 두개의 흐름의 遷移領域의 系統的인 性質을 表示하고있다. 萬一 水路末端의 平均水深 및 Froude數가 決定된다면 이 그림에서 주어진 下流水深에 對하여 水路床의 높이를 求할수있다. 水路構造物을 保護하기 爲하여 豫想할수있는 最大 Froude 數에 對해서 跳水가 생기는데 必要한 最底의 下流水深을 가지겠끔 設計해야한다.

V. 結論

幅이 擴大하는 水路를 흐르는 射流에 對해서波動理論을 應用하여 理論中에 包含된 各種의 假定이 近似的으로 滿足된다면 實驗과 本質的으로 一致하는 結果를 얻게된다. 그러나 設計를 爲해서는 斷面이 擴大하는 모든 境遇에 對한 測定值를 最初의 Froude 數 F_1 및 相對的位置의 函數로 表示하여 한장의 一般化된 圖面으로 그려 놓으면 便利하다. 그리고 같은方法으로써 漸次的으로 擴大하는 水路에 對해서도 모든 Froude數와 幅의 擴大率에

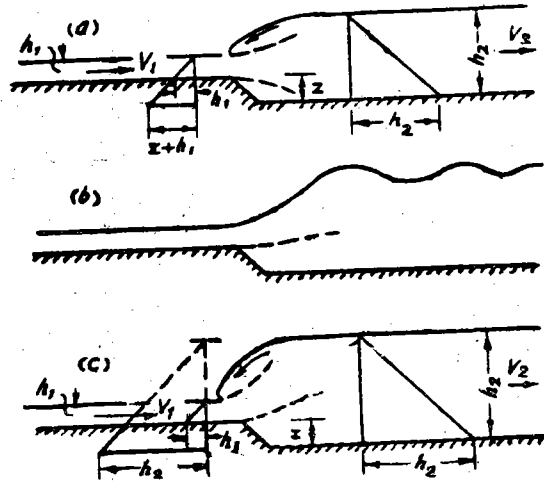


Fig. 60. - Alternate Forms of The Hydraulic Jump at an Abrupt Drop

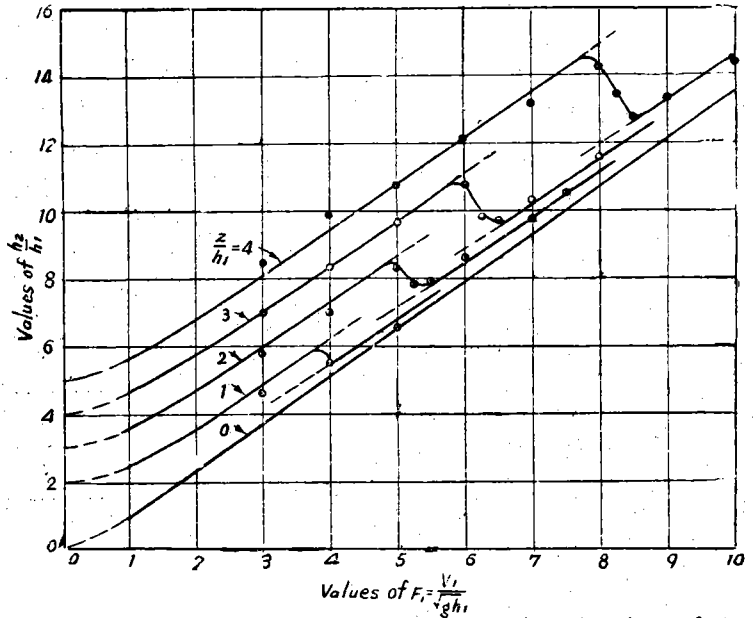


Fig. 61. - Analytical and Experimental Characteristics of the Hydraulic Jump at an Abrupt Drop

關해서 直刻的으로 가장 좋은 曲線形을 撰할수 있겠끔 해놓으면 便利하다. 擴大水路의 末端에서 생기는 非對稱의 흐름을 避하기 爲하여 水路床를 깊게하여 跳水現象을 安定시켜야 하고 그 깊이는 運動量方程式으로 決定된다.

(筆者: 서울大學校 工科大學 助教授)