

<技術報文>

沿岸檢潮所의 設計基準

Design Criteria for Coastal Water Level Gauging Station

崔 秉 昊*

1. 序 言

우리나라 西南海岸에 干拓事業 및 港灣開發이 活潑하며 感潮河口에는 防潮堤建設事業들이 進行되고 있는바 沿岸水位의 正確한 觀測 및 分析은 物理海洋學的 側面에서 뿐 아니라 이러한 沿岸構造物의 設計 및 環境評價를 위해서 極度로 重要한 일이다. 大部分의 計測工學에 있어 0.1cm 程度의 精密度를 갖는 觀測은 容易한 일이겠지만 沿岸水位의 觀測은 靜止 水面의 觀測이 아니고 短周期波浪에 의해 每秒 數 cm의 海面이 變化되는 惡條件下의 觀測이다. 따라서 誤差를 가능한 한 除去하여 瞬間水位를 適切히 平均하여 0.1cm 程度의 精密度를 갖는 水位觀測을 하는 것이 沿岸檢潮의 目的이다. 通常의 으로 많이 利用되는 沿岸檢潮方法은 檢潮標尺, 檢潮우물 및 壓力式檢潮儀이며 各 方法에 따른 理論的인 뒷받침은 近年에 비로소 確立되었는데 Australia의 J. Noye 教授의 Tide Well System에 대한 一聯의 研究^{(1)~(3)}, 英國海洋研究所 D.T. Pugh 等의 各種檢潮儀의 特性實驗 및 Bubbler Gage의 改善에 따른 研究^{(4)~(6)}, 英國水理研究所의 感潮河川에서의 浮子式水位計의 誤差分析研究⁽⁷⁾ 等이다.

우리나라의 境遇 勸奨되는 適切한 設計基準 및 觀測基準이 設定되어 있지 않은 바 本 稿에서는 設計工學者들이 標準觀測體系의 設計에 容易하게 適用할 수 있는 圖表와 基本公式를 提示하고 長短點을 論하였다.

2. 檢潮標尺

눈금이 새겨진 標尺에 의한 觀測은 가장 오래된 經濟的인 方法이다. 이 方法은 數日의 觀測에는 適合할지 모르나 한달以上의 長期觀測에는 適合하지 않으며

夜間觀測值는 誤差가 크다. 晝夜交代로 觀測할 境遇 두 觀測者에 의한 讀取傾向에 따른 體系誤差가 발생하기 쉬우며 특히 短周期波浪效果를 除去하기 위해 平均值를 取할 때 1.5m의 波高에 대하여 5cm 程度의 標準遍 差를 갖는 讀取誤差가 發生한다. 短周期波浪에 의한 誤差를 줄이기 위해 改良된 檢潮標尺은 그림 1과 같이 設計될 수 있다. 이 設計는 透명한 비닐호스를 標

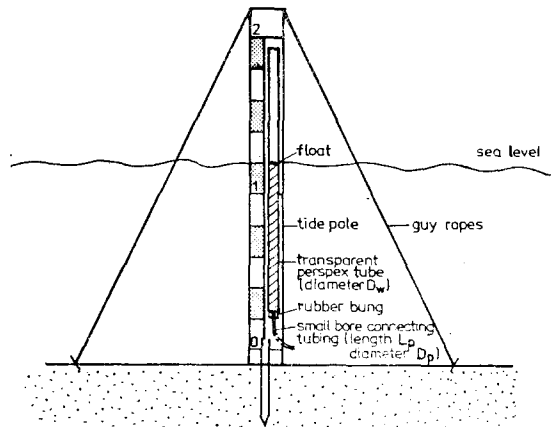


그림 1. 改良된 檢潮標尺의 概略圖

尺에 부착시키고 하단튜브를 통해 海水가 流入되게 함으로서 導水管을 갖는 檢潮우물과 同一한 效果를 갖고 자하는 것이다. 비닐호스안에는 有色染料나 작은 浮子를 넣어서 水面境界의 判別을 容易하게 할 수 있다. 그림 1에 제시된 體系의 波浪減衰特性(wave damping characteristics)은 理論的으로 提示될 수 있는 데 時間常數(time constant), τ 는 다음과 같다.

$$\tau = \frac{32\nu L_p D_w^2}{g D_p^4} \dots \dots \dots (1)$$

여기서 ν 는 海水의 動粘性係數(7°C 海水에서 $1.4 \times 10^{-6} m^2 S^{-1}$)이며, D_p, L_p 는 下端연결튜브의 內徑과 길이,

* 成均館大學校 工大 副教授 · 土木科

D_w 는 비닐호스의 내경이며 g 는重力加速常數이다. 波浪減衰係數, α 는 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{1}{(1 + \omega^2 \tau^2)^{\frac{1}{2}}} \dots \dots \dots (2)$$

여기서 ω 는海面變化曲線을 $asin\omega t$ 로 假定할 때의角速度이며 位相差; $\theta = -\theta = \arctan(\omega\tau)$ 인 바 θ 가 작을 때 τ 의 滯遲時間을 갖는다. 그림 1의 體系를 7°C의 海水에서 $D_w=2.5\text{cm}$, $L_P=2.7\text{m}$, $D_P=0.4\text{cm}$ 로 할 때 時間常數는 約 30秒이다. 그림 2는 여러 時間常數(5, 10, 20, 40秒)를 갖는 體系에 대한 波浪減衰係數를

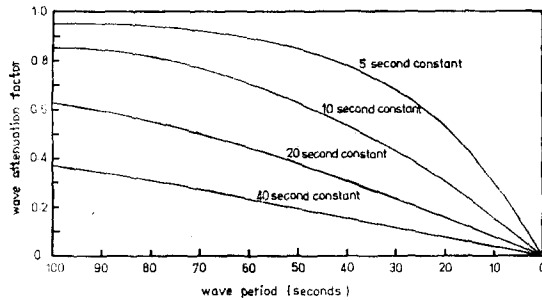


그림 2. 여러 時間常數의 線型體系에서의 波浪振幅減衰 제시하고 있는 바 20秒의 時間常數로서 設計된 體系에서는 10秒周期の 波浪은 振幅이 0.08로 減衰된다. 이와 같이 改良된 檢潮標尺의 重要한 點은 體系가 線型反應을 한다는 點이다. 卽 波浪減衰係數가 波의 振幅에는 獨立的이므로 중첩된 여러波의 周期에 關係 獨立的으로 體系의 反應을 評價할 수 있다는 點이다. 더 現代的인 商用檢潮標尺으로는 電子式 檢潮標尺(electronic tide pole)이 있는데 짧은 瞬間多數의 觀測을 遂行하여 內藏된 analogue filter에 의해 短周期波浪을 除去시킨다. 그림 3은 30秒 및 60秒間 觀測된 海面을 平

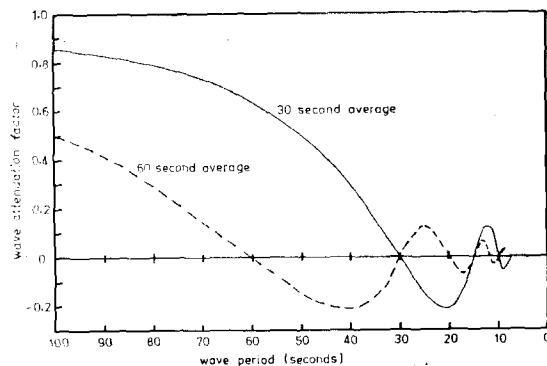


그림 3. 電子式 檢潮標尺에 의한 波浪減衰效果

均할 때의 電子式 檢潮標尺의 波浪減衰效果를 提示한다. 부득이하게 檢潮標尺이 利用되어야 할 境遇改良된

標尺體系의 利用이 勸奨되며 電子式 檢潮標尺은 dolphin 橋脚等に 設置하여 長期觀測에도 利用될 수 있다.

3. 檢潮우물

대부분의 固定(永久)檢潮體系는 우물型檢潮所에 自己記錄裝置가 附着되어 있는 形態이다. 이 檢潮形式은 短周期波浪이 잘 除去되며 維持保修가 比較的 容易하다. 그러나 潮汐週期동안 密度變化에 의한 우물内外의 水位差, 導水管을 가로 지르는 強한 흐름이 있을 경우 Bernoulli 效果에 의한 우물内の 水位下降 등이 問題되어 왔다. Noye는 Orifice 形式과 導水管形式우물에 대한 反應特性을 徹底하게 比較研究하였는데 導水管形式이 우월한 方式임을 提示하였다.

3.1. Orifice 型 檢潮우물

Noye는 이 型式의 우물이 非線型體系 卽 波浪에 대한 反應이 波의 周期和 振幅에 關係된다 하였으며 우물 外側의 調和入力에 대한 反應을 無次元化된 周波數(dimensionless frequency), β_1 으로 표시하였다.

$$\beta_1 = \frac{\omega \sqrt{a}}{C_1} \dots \dots \dots (3)$$

여기서 $C_1=0.6(2g)^{\frac{1}{2}} \frac{A_P}{A_w}$ 로 정의되는 우물常數(well constant)이며 A_P, A_w 는 各己 오리피스와 우물의 斷面積이다. 그림 4는 英國의 檢潮儀管理구들이 勸

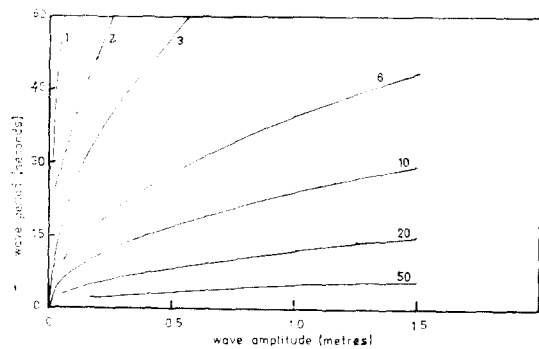


그림 4. $A_w=0.01$ 일 境遇의 算定된 β_1 曲線

奨하는 $A_P/A_w=0.01$ (이 境遇 $C_1=0.0265\text{m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$)일 때 波浪의 振幅과 周期の 函數로서 β_1 係數를 算定하는 曲線이다. 이 β_1 係數와 그림 5의 曲線을 利用하면 오리피스型우물의 波浪減衰와 遲角을 算定할 수 있다. 例로서 振幅 70cm, 周期 10秒인 波浪은 $\beta_1=20$ 이며 우물内の 波浪減衰는 0.05 및 87°의 遲角을 갖는다. 潮汐周波帶에서의 振幅反應은 概略的으로 다음과 같다.

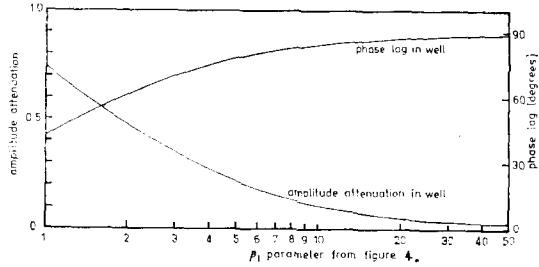


그림 5. 오리피스형 우물의 波浪減衰 및 遲角

$$\alpha = 1 - 0.64 \beta_1^4 \dots \dots \dots (4)$$

$$\theta = \frac{8\beta_1^2}{2\pi} \dots \dots \dots (5)$$

$A_p/A_w=0.1$ 로 設計를 하면 潮汐은 뚜렷한 振幅減衰와 遲角이 발생하지 않는다. 이 檢潮우물의 問題點은 우물外側의 固有周期에 대한 反應外에 우물內에서 短周期, 高周波의 波가 發生한다는 點과 波浪振幅에 關聯하여 우물內外에 體系의인 誤差가 發生하기도 하는 點이다.

3.2. 導水管型 檢潮우물

이 型式의 우물은 오리피스型 우물보다 여러 長點이 있는데 우물의 特性을 우물直徑(D_w), 導水管直徑(D_p) 및 길이(L_p)로서 評價할 수 있다. Noye의 導水管型 우물特性(well characteristics)을 정의하는 無次元係數 N 은 다음과 같다.

$$N = \frac{128\nu^2 L_p D_w^2}{g D_p^6} \dots \dots \dots (6)$$

短周期波浪의 影響을 除去하기 위한 N 의 最適値는 $\frac{1}{3}$ 이다. N 이 5보다 크면 改良된 標尺의 公式 (1)이 適用되며 N 이 $\frac{1}{3}$ 보다 작으면 우물外側의 長週期波의 增幅이 發生한다. 이 우물型의 時間常數, $\tau = N \frac{D_p^2}{4\nu}$ 으로 제시되는데 最大許用遲滯時間을 潮汐의 境遇 40秒로 하면 導水管의 直徑은 2.5cm이며 이를 (6)式에 代入하면 導水管길이와 우물直徑과의 關係가 다음과 같이 成立된다.

$$L_p D_w^2 = 3.2 m^3 \dots \dots \dots (7)$$

導水管의 길이는 隣近의 깊은 水深까지의 거리를 갖는 現場條件에 따라 달라지며 L_p 가 결정되면 우물直徑을 구할 수 있다. 만일 既存의 오리피스型 우물들을 改良 하려면 式 (7)의 條件에 符合되도록 2.5cm 內徑의 導水管을 設置하면 된다. 그림 6은 우물直徑과 導水管 길이와의 關係를 提示한다. 即 60cm 直徑의 우물을 위한 導水管의 길이는 約 8.9m가 되어야 하는데 깊은 水深까지의 거리가 이보다 짧으면 曲管配列로서 設置한

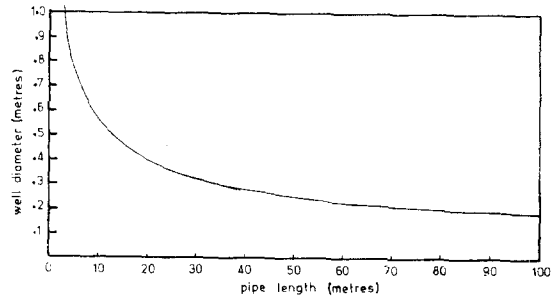


그림 6. 우물直徑과 導水管길이와의 關係

다. 導水管直徑이 커지면 $N = \frac{1}{3}$ 로 固定시킬 境遇潮汐 周波帶內에 許用할 수 없는 時間遲滯(time lag)가 發生한다. 管徑이 작으면 泥土에 의해 管子 막힐 염려가 있는 바 管子를 交換시킬 수 있도록 設計해야 한다.

이러한 線型體系의 우물을 위해서는 導水管內의 흐름은 層流條件을 반드시 滿足시켜야 한다. 이렇게 設計된 線型우물의 檢潮結果는 調和分析에 의해 分潮의 振幅과 位相을 구할 수 있는데 이 結果는 다시 우물體系의 反應特性을 考慮하여 更正될 수 있다.

더 仔細한 導水管型 우물의 諸元을 算定하기 위해 컴퓨터프로그램이 設計에 利用될 수 있는데 $N = \frac{1}{3}$ 일 때 여러 導水管 直徑에 대한 最適의 길이와 우물 直徑을 $\nu = 1.37 \times 10^{-6} m^2 S^{-1}$ 인 경우에 대해 算定한 것이 表-1에 例示된다. 또한 여러 半日週潮振幅에 대한 導水管

表-1. 線型우물設計프로그램에 의한 우물諸元

D_p	cut-off period	潮汐의 time lag	최적 L_p^*	D_w
0.95cm	24.9초	5.5초	0.95m	10.3cm
1.27	44.2	9.8	1.27	21.2
1.59	69.1	15.3	1.59	37.0
1.91	99.6	22.1	1.91	58.4
2.22	135.5	30.1	2.22	85.9
2.54	177.0	39.3	3.66	100.0
2.86	224.0	49.7	7.41	100.0
3.18	276.5	61.4	13.94	100.0
3.49	334.6	74.3	24.7	100.0
3.81	398.2	88.4	41.6	100.0

* $L_p > 100 D_p$ 의 條件이 適用되었음.

內의 레이놀즈數를 最大 1300으로하여 層流狀態로 유지하기 위한 最大우물直徑을 算定한 것이 表-2에 提示되고 있다.

表一-2. 半日週潮振幅에 따른 最大 浮物直徑

半日週潮振幅(m)	最大浮物直徑(cm)
0.8	94
1.0	79
1.5	62
2.0	52
3.0	41
4.0	34
5.0	30
6.0	27

* $L_p=3m$ 에 대해 算定한 것임

3.3. 浮物設計를 위한 其他 考慮事項

浮子の 直徑을 크게 設計하면 平衡錐(counterweight)에 의한 기어의 後進(back-lash)에 의한 誤差를 줄일 수 있다. 기어後進誤差는 다음과 같이 提示된다.

$$\Delta h = \frac{8F}{\pi D_f^2 \rho} \dots\dots\dots (8)$$

여기서 F 는 記錄計摩擦에 抵抗하기 위한 質量, D_f 는 浮力直徑, ρ 는 海水密度인 바 F 가 0.2kg, $D_f=0.2m$ 일 때 Δh 는 0.012m가 된다.

檢潮浮物周圍에 강한 흐름이 있을 경우에 오리피스 주변에 壓力變化가 생긴다. Halliwell과 Perry⁽⁸⁾의 實驗結果는 $\frac{u^2}{2g}$ 에 해당하는 水頭損失이 浮物內에 發生하는 것이 지적되었는데 그림 7은 흐름이 2m/s 까지

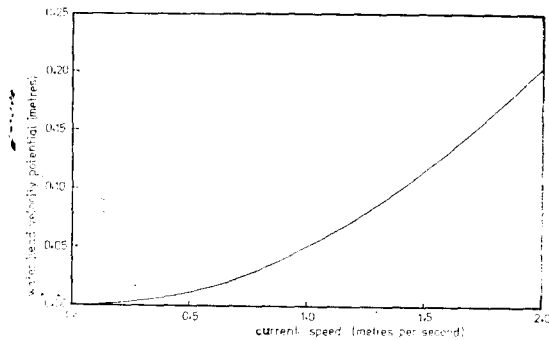


그림 7. 오리피스주위의 유속에 따른 水頭損失

의 水頭損失을 提示하고 있다. 이러한 誤差는 導水管型 浮物을 設計하므로써 줄일 수 있는데 管을 흐름方向과 같은 方向으로 設置하고 흐름에 直角되게 오리피스孔을 뚫어서 海面을 正確히 觀測하기 위한 靜壓水頭를 形成할 必要가 있다.

4. 壓力式 檢潮儀

壓力式 檢潮儀의 原理는 低潮下의 一定水深에서의 靜水壓의 變化를 地上에 位置한 記錄하는 것인데 壓力容器가 壓力感知器와 記錄計에 各已 連結된 體系이다. 潮汐週期를 통한 容器의 容積變化는 基準面의 變化를 유발시키므로 精密한 觀測을 위해서는 動蕩하지 못할 方法이다. 따라서 이러한 短點을 補完하기 위한 檢潮儀가 Bubbler 檢潮儀이다.

Bubbler 檢潮儀는 壓力容器로부터 壓縮 공기(또는 餘他 氣體)를 발브를 거쳐 壓力減小을 시켜 一定流量이 水中오리피스(壓力點)를 통해 放出되도록 설계된 것이다. 水中出口에서의 氣體 放出은 아주 느려 氣體壓力은 水壓과 平衡을 이루며 이 壓力點은 波浪에 의한 誤差가 적도록 設計된다. 記錄計와 水中出口와의 連結管에 의한 작은 壓力差를 무시하면 觀測壓力은 다음과 같다.

$$P_m = \rho gh_m + P_A \dots\dots\dots (9)$$

微差壓力感知計(differential pressure transducer)를 利用하면 ρgh_m 의 變化를 觀測記錄할 수 있다. 이 Bubbler 體系의 長點은 基準面의 安定性, 水中部分의 價格이 저렴하고 交換可能하다는 점, 記錄計를 튜브에 連結하여 數百 m까지 멀리 設置할 수 있는 點이다. 短點은 觀測壓力을 水位로 變換시키기 爲해서는 潮汐週期內의 密度變化를 알아야 된다는 點과 긴 튜브를 連結管으로 利用할 때 壓力降下에 의한 誤差는 튜브길이의 子乘에 比例하여 커지는 點이다. 그림 8은 보통狀況의 標準型 Bubbler 體系를 提示하고 있다.

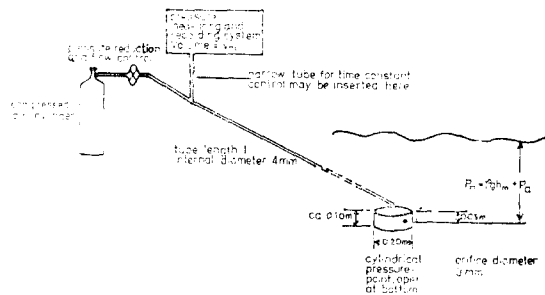


그림 8. 標準型 Bubbler 體系

4.1. 短管의 Bubbler 體系

그림 8의 標準體系는 內徑 4mm의 플라스틱外皮로 된 나일론管을 利用하는데 壓力點은 最低潮位보다 적어도 1m 以下에 設置하는 데 橋脚에 主로 設置한다. 壓力點은 20cm 直徑의 Alkathene 파이프를 使用하는데

下部는 開放시키고 上部에서 5cm 밑에 3mm 程度의 오리피스를 뚫는다. 그림 8의 標準體系를 위한 空氣 공급율은 그림 9에 提示되는 減壓발브와 流量제어

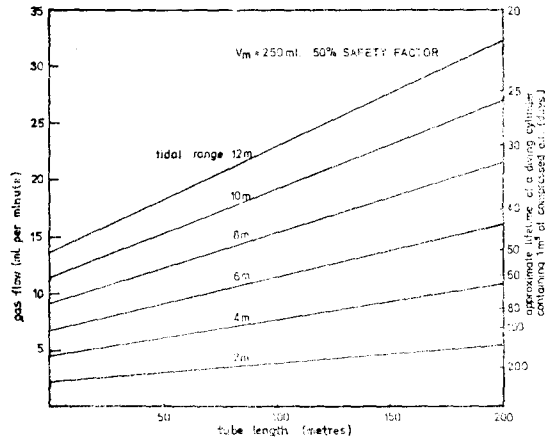


그림 9. 標準體系를 위한 空氣공급율

발브로서 調節한다. 水位上乘에 따른 壓力增加를 補正하기 위한 最小空氣공급율은 다음 식으로부터 계산된 것이다.

$$\text{最小流量 (ml/分)} = \frac{\text{(體系容積)}}{600} \times \text{(時間當最大水位上乘率)} \quad (10)$$

連結 튜브延長이 增加하면 體系容積이 늘어나므로 最小流量이 증가된다. 또한 潮差가 커지면 最小流量도 커진다. 제시된 그림 9는 記錄計의 容積이 250ml 일 때 50%의 安全率까지 考慮된 狀況에서의 最小流量이다. SCUBA 탱크가 容易하게 利用될 수 있으므로 이를 利用할 때의 使用期間이 그림 9의 右側軸에 제시되어 있다. 그림 10은 그림 8에 提示된 標準 Bubbler 體系에서 發生될 수 있는 最大誤차를 提示하고 있는 바 그림 9의 流量計條件과 2m, 4m의 波高의 境遇가 假定되었

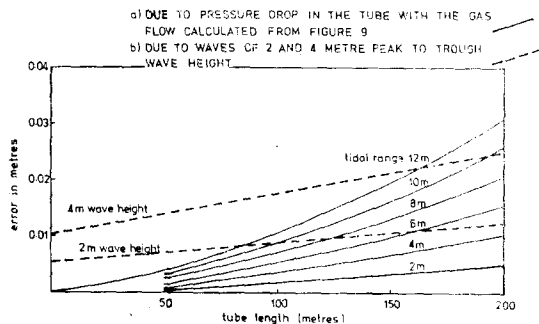


그림 10. 標準 Bubbler 體系에서 發生될 수 있는 誤차

다. 튜브延長의 子乘에 概略的으로 此例하여 增加되는 튜브壓力降下에 의한 誤차가 잘 제시되고 있다.

4.2. 長管의 Bubbler 體系

連結 튜브가 200m 以上인 Bubbler 體系는 매우 주의해서 設計해야 한다. 壓力點을 海底가까이 設置하고 壓力點과 튜브의 容積을 記錄裝置의 容積보다 훨씬 크게 設計할 境遇의 最適設計基準은 다음과 같다.

壓力點원통용기의 半径 : $0.2 D_p \left(\frac{L_p}{K} \right)^{\frac{1}{2}} \times 10^{-3} (m)$

壓力點원통용기의 높이 : $1.6K (m)$

最小기체流量 : $0.0016 (\gamma D_p L_p) ml/분$

튜브의 最大損失水頭 : $2.8 \gamma \left(\frac{L_p}{D_p} \right)^2 \times 10^{-6} (m)$

여기서 D_p 는 連結 튜브의 內徑(mm), L_p 는 튜브延長(m), K 는 體系의 正確度(m), γ 는 最大潮位上乘率(m/hour)이다. 英國海洋研究所는 印度洋에서 460m의 連結 튜브를 갖는 Bubbler 體系로 潮汐을 觀測한 바 있다.

4.3. Bubbler 體系에서의 其他考慮 事項

200m 보다 긴 連結 튜브를 갖는 Bubbler 體系에서 短周期波浪의 影響은 긴 튜브自體에 의해 除去된다. 200m 보다 짧은 관을 갖는 體系에서는 그림 8에 提示된 대로 記錄裝置에 連結된 管에 縮小部를 設置하여 波浪影響을 除去시킬 수 있는데 이 部分은 檢潮우물에서의 導水管과 같은 役割을 한다. 이 Bubbler 體系의 時間常數는 다음과 같다.

$$T = \frac{128 V_m \eta t}{\rho g (10 + h_m) \pi d^4} \dots \dots \dots (10)$$

여기서 V_m 은 記錄計의 기체容積, ρ 는 海水密度, h_m 은 體系의 壓力水頭, η 은 氣體의 動粘性係數($10^\circ C$ 空氣 $\eta = 17.6 \times 10^{-6} m^2/sec$)이며 d 는 縮小管의 內徑이며 t 는 縮小管의 길이이다. 例로서 $V_m = 225ml$, $h_m = 0.5m$, $d = 0.8mm$, $t = 5m$ 일 때 理論的인 時間常數는 19秒이다. 부가하여 오리피스孔은 흐름方向의 正面에 設置해야 하는데 흐름의 停滯點周圍에 35° 以內에 구멍을 뚫는 것이 좋다.

5. 結 言

本稿에서는 通常的으로 많이 設置되는 檢潮標尺, 檢潮우물 및 壓力式 檢潮體系의 設計에 有用한 公式들과 그래프들을 收錄하였다. 더불어서 設計時 考慮되어야 할 事項들을 要約하면 다음과 같다.

가) 短期觀測에 標尺이 利用될 때 改良된 標尺이 勸奨된다.

나) 우물型 檢潮體系는 導水管이 設置된 方式이 바

람직하며 오리피스型 우물은 導水管型으로 改良시킬 것이 勸奨된다.

다) 壓力式 檢潮體系는 短, 中期觀測에 適合하며 Bubbler型 標準設計가 200m 以內 튜브連結에 勸奨되며 그 以上은 特殊設計가 必要하다.

우리나라의 近代의인 沿岸水位 및 感潮河川의 水位 觀測은 20世紀 初葉부터 시작되었으나 檢潮體系를 科學的으로 適切히 評價한 적은 이제까지 없는 것 같다. 既存의 沿岸 및 河川의 檢潮體系에 대한 適切한 評價가 너무 늦기 前에 遂行되어 改善, 補完을 통해 貴重한 우리나라 地球物理學的 時系列資料의 整備에 신경을 써야 할 시점에 있다.

參 考 文 獻

1. Noye, B.J., 1974a. Tide-well system I : Some non-linear effects of the conventional tide well. J. Mar. Res., 32(2), pp.129—153.
2. Noye, B.J., 1974b. Tide-well system II : The frequency respons of a linear tide-well system. J. Mar. Res., 32(2), pp.155—181.
3. Noye, B.J., 1974c. Tide-well system III : Improved interpretation of tide-well records. J. Mar. Res., 32(2), pp.193—194.
4. Pugh, D.T., 1972. The physics of pneumatic tide gauges. Int. Hydrogr. Rev., 49(2), pp.71—97.
5. Pugh, D.T. and W.R. Waller., 1975. Sea-level measurements in the Wash Bay. Proc. 14th I.C. C.E., Copenhagen, 1974, ASCE, pp.2519—2538.
6. Lennon, G.W., 1971. Sea level instrumentation Int. Hydrogr. Rev., 48(2), pp.129—148.
7. Cook, M.G., 1972. Errors in tide gauging: an experiment at a tide gauge on the River Great Ouse. Hydraulics Research Station INT110, Wallingford, Oxon.
8. Halliwell, A.R. and J.G. Perry., 1968. Errors in tide gauges. The Dock and Harbour Authority, 48, No. 568, pp.305—308.