

〈技術報文〉

高流速 水理 構造物의 給氣(Aeration)裝置 設計

李 應 仟*
Lee, Eung Chon

1. 머리말

高流速을 갖는 水理 構造物(댐의 餘水路, 放流설비등)은 表面 凹凸의 정도, 流速의 크기 등에 따라 다르겠지만 Cavitation에 의해 損傷을 입을 수 있다.

最近 高流速의 흐름에 공기를 混入(Air entraining)시킴으로써 Cavitation bubble의 形成을 억제하고 또 混入공기에 의한 空穴 작용에 의해 構造物 표면의 Cavitation 損傷을 방지할 수 있음이 입증됨에 따라 高流速 水理 構造物의 설계에 給氣(Aeration) 장치를 채택하는 추세에 있으며, Cavitation 損傷을 입게 된 구조물의 補修時에 給氣 장치를 추가로 설치하는 경우도 있다

水理 構造物에 대한 給氣 개념의 도입이 아직까지 많은 水理 技術者에게 생소한 분야이기 때문에 이의 적용에 대한 沿革을 간단히 소개함과 아울러 現在까지 模型實驗 및 實物관측을 통하여 밝혀진 外國에서의 研究 성과들을 기초로 餘水路의 給氣장치를 設計하는 절차를 실제 計算例와 함께 제시함으로써 앞으로 給氣 장치를 設計하는데 도움이 되고자 한다.

2. 給氣 裝置적용의 沿革

水理 構造物에 대한 Cavitation 現狀이 인식되기 시작한 것은 1930年代 이었지만 1970年代末까지도 이에 대한 解決策으로서는 단지 Cavitation이 예상되는 部分에 鐵物과 같이 쉽게 損傷을 입지 않는 재료를 사용하거나 또는 限界가

있기 마련이지만 Cavitation의 발생을 避할 수 있는 構造 形象을 채택하고 施工에 있어서도 엄격한 示方을 적용하는 것이었다. 美國의 경우 이미 1960年代에 開拓國(USBR)에서 空氣 混入에 대한 개념이 인식되었으나 실제 적용을 위한 研究는 미흡하여 構造物의 設計에는 일찌기 적용되지 못하였으며, 開水路에 대한 給氣 개념을 設計 기준으로서 가장 먼저 확립한 나라는 러시아에 이어 南美 國家들이다.

西方세계에서 처음으로 設計 단계에서 대규모의 水理 構造物에 이를 적용한 것은 1980年 完工된 브라질의 Foz de Areia 댐의 餘水路(120m 落差)로서, 完工後 放流量 8,500m³/s의 洪水(設計洪水量: 11,000m³/s)를 겪었으나 전혀 Cavitation 損傷을 입지 않았다고 한다. 한편 베네주엘라의 Guri 댐은 既存의 높이 100m 댐을 150m로 높이면서 餘水路에 給氣 장치를 설치한 경우로서 既存의 餘水路는 상당한 Cavitation 損傷을 입은 상태였으나 이에 덧붙여 增設한 餘水路에서는 工事後 10,000m³/s의 流量으로 約 100日 동안 운영되었으나 아무런 피해도 입지 않았다고 한다.

우리 나라의 경우는 忠州 多目的댐(1986年 完工)의 施工 과정에서 世界銀行(IBRD)의 Consulting Panel의 강력한 권고에 따라 餘水路에 給氣 장치가 처음으로 설치되었고 그후 三浪津 揚水發電 下部댐의 餘水路에도 설치된 바 있다.

3. Cavitation 발생 可能性의 檢證

高落差의 댐 餘水路 또는 放流 시설에서는 사

* 本學會 正會員(株) 三安建設技術公社 常務理事 技術士

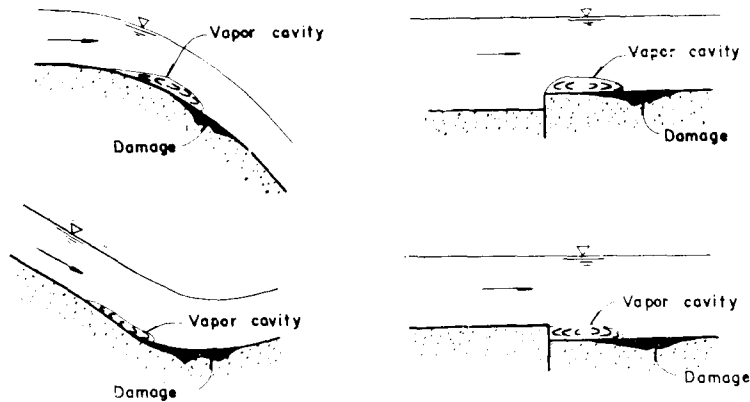


그림-1 水路 表面의 不均一에 의한 Cavitation 發生 형태

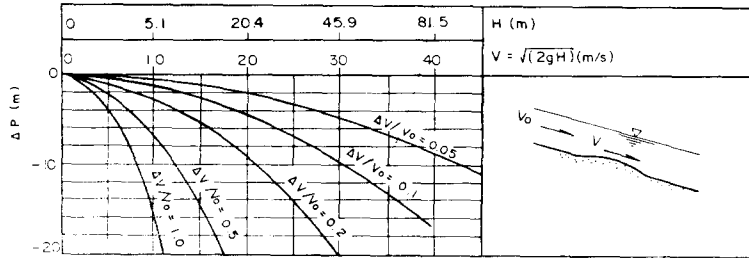


그림-2 局部的인 流速 變動에 따른 壓力 低下

용 材料의 특성이나 만족스럽지 못한 施工 管理로 인해서 흐름과 接하는 구조물表面에 생긴 凹凸, 水路의 단곡, 施工이음부의 段落등으로 因하여 Cavitation이 發生할 수 있다.

구조물 表面의 凹凸등(그림-1)은 이 部位에 대한 局部的인 壓力강하를 초래하며, 壓力이 流體의 飽和 蒸氣壓 이하의 壓力이 되면 流體 내부에 低壓의 공기 주머니(Cavitation bubble, Vapor cavity)를 形成하게 된다.

이 공기 주머니가 下流로 이동하여 壓力이 높은 部位로 다시 進入하게 되면 공기 주머니의 상태를 유지할 수 없게 되므로 壓縮 決潰되며, 이때 구조물 表面에 큰 충격압을 加하게 된다. 이러한 低壓 部位가 생기지 않도록 하기 위해서는 구조물 表面을 Grinding 하거나, 이음부에 Chamfer를 설치하는 등으로 구조물 表面을 원활하게 할 필요가 있으나, 流速이 증가함에 따라 局部的인 流速 變動에 따른 壓力 低下는 대단히 민감하여(그림-2 참조) Cavitation의 發生 가능성이 급격히 增大하기 때문에 단순히 表面 處理만으로는 對處할 수 없게 된다. 따라서 이러한 경우에는 給氣 장치의 설치 또는 구조물

形象의 변경 등을 고려하여야 한다. 그러나 鑿造物의 形象 또는 配置는 地形과 地質 조건에 맞추어 設計하는 것이 가장 經濟的인 反하여 이와 같이 水理的인 制約條件을 만족시키기 위해서는 많은 追加 工事費를 필요로 하게 된다.

Cavitation의 發生가능성은 다음의 Cavitation 指數로서 판단할 수 있으나, 流速만을 고려

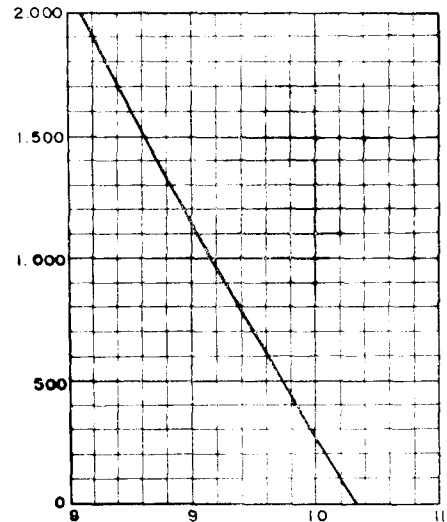


그림-3 高度別 大氣壓(大氣 온도 10°C 基準)

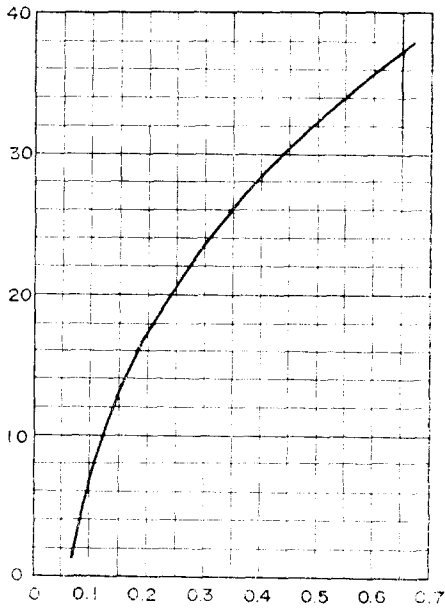


그림-4 水溫別 물의 飽和 蒸氣壓

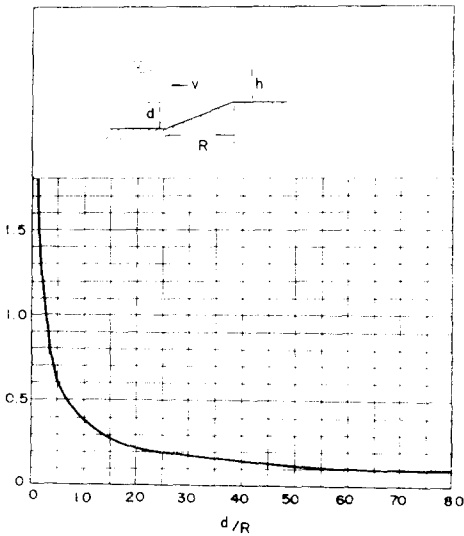


그림-5 水路 段落部の Cavitation 指數

할 때 경험적으로 10m/s 以上の 흐름에서는 일단 Cavitation 의 발생 可能性이 있는 것으로 알려져 있다.

$$\text{Cavitation 指數 } (\sigma) = (P_w + P_a - P_u) / (V^2 / 2g)$$

式에서, P_w = 計器 압력 (水壓)

P_a = 大氣壓 (그림-3)

P_u = 流體의 포화 증기압 (그림-4)

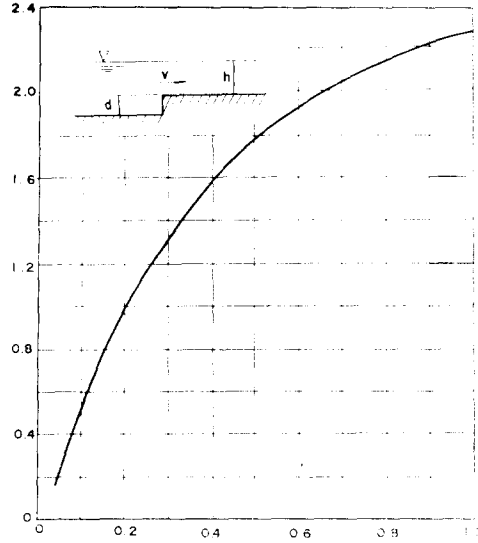


그림-6 水路 突出部の Cavitation 指數

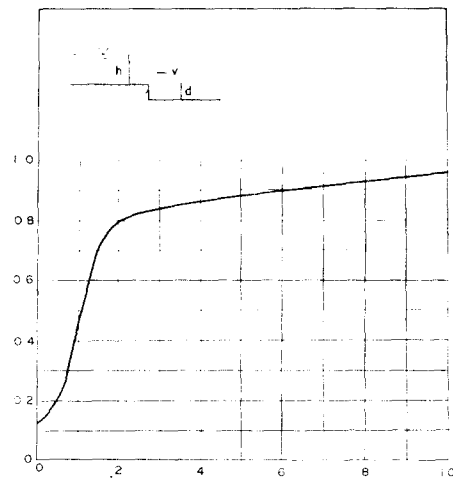


그림-7 Chamfer 部の Cavitation 指數

V = 平均流速

위 式으로 계산된 값이 限界值 (σ_c) 보다 작으면 Cavitation 이 발생한다. σ_c 에 대한 圖表를 그림 5, 6, 7 에 收錄한다.

4. 給氣 裝置의 設計

給氣 裝置를 設計함에 있어서 가장 기본적으로 결정되어야 할 사항은 給氣 裝置의 設置 位置와 給氣 裝置를 통해 공급해야 할 공기량이다. 給氣 裝置의 設置 位置는 원칙적으로 앞의 3項

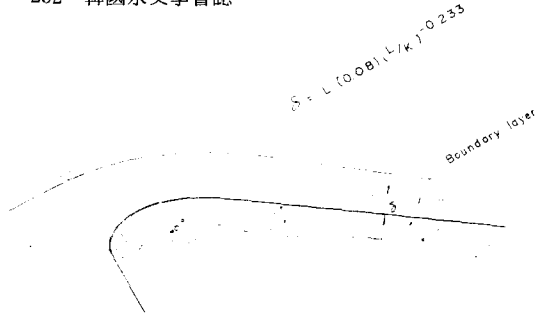


그림-8 水路 縱斷에 따른 境界層의 擴張

에서 記述한 질차를 따라 검정할 때 Cavitation 이 발생하기 시작하는 地點이 될 것이다. Cavitation 의 위험을 억제시키기 위해 필요한 공기의 濃度(공기의 體積/물과 공기의 혼합 體積)는 經驗적으로 구조물의 表面 부근에서 5~10% 정도이다. 混入된 공기는 교란된 흐름 상태를 나타내는 境界層(Boundary layer)에서만 존재하는 것으로 보며, 흐름이 下流로 진행함에 따라 境界層의 범위가 확장되기 때문에 (그림-8) 공기의 濃度は 줄어 들고 또한 에너지 減勢工으로서 Flip bucket 을 설치하는 경우는 Bucket 지점에서의 遠心 영향에 의해 混入 공기가 水表面으로 상승하여 바닥 부근의 濃度は 더욱 줄어들게 된다.

그러므로 水路의 연장이 긴 경우에는 下流 구간에서도 필요한 공기 濃度を 확보하기 위해서 給氣 장치를 추가로 설치해야 한다.

댐 餘水路의 給氣 장치를 設計함에 있어서 고려해야 할 質차를 記述하면 다음과 같다.

(1) 設計 洪水量 및 洪水量의 변동 범위를 결정한다.

(2) 餘水路를 따라 水面의 縱斷곡선 및 境界層의 발달 범위(Boundary layer thickness)를 결정한다.

(3) 예상되는 水路 表面의 凹凸을 고려하여 Cavitation 指數를 계산하며, 限界 指數와 비교함으로써 給氣 장치의 필요성 여부를 檢정하여 給氣 장치의 설치 위치를 결정한다.

(4) 假定한 給氣 Ramp의 규모별로 공기 공급량을 계산한다. 공기 混入의 메카니즘은 相關 因子가 많아서 간단히 解析的으로 구할수는 없으나 크게는 射出水(Water jet)의 점프 길이

(그림-9) 및 流速에 비례하며, 실험에 의하면 다음 式으로 표시할 수 있는 것으로 알려져 있다.

$$Q_a = C_a \cdot V \cdot L_t \cdot W$$

式에서, Q_a =공기량

V =給氣 램프上的 流速

L_t =射出水の 射出 길이

W =餘水路의 폭

C_a =變數로서, 0.02~0.03의 범위

현재로서는 射出 길이를 水理 模型 실험 또는 數値해석을 통하여 결정할 수 밖에 없으나, 外國 여러 기관에서 광범위한 水理 실험을 통한 設計 자료의 작성이 진행중에 있으므로 조만간의 利用이 가능하리라 본다.

(5) Jet의 下端 Nappe의 아래 부분에는 給氣管(Air vent)의 Head loss로 인하여 負壓이 발생하며, 이 負壓의 정도에 따라 Jet의 射出 길이가 달라진다.

따라서 模型 실험으로 檢정한 負壓對 射出 길이의 관계 곡선과 공기 공급량對 負壓의 관계 곡선의 交點이 實物에서의 給氣量과 負壓에 해당한다.

주어진 給氣管의 形象에 따른 負壓의 규모는, 水理學에서 작용하는 流入, 마찰등의 損失 계수와 물과 공기의 密度의 比(0.0012)를 적용함으로써 계산할 수 있다.

(6) 境界層 內에서의 공기 濃度を 다음 式으로 계산하여 餘水路의 각 縱斷 구간에서 충분한 공기 濃度(5~10%以上)가 확보 될 수 있는 지를 檢정한다.

$$C = \frac{Q_a}{Q_a + Q_w}$$

式에서, C =공기 濃度

Q_a =공기량(Air discharge)

Q_w =경계층 內의 流量(Water discharge)

위의 式으로 계산한 地點別 공기 濃도가 기준치에 未達할 경우는 Ramp의 규모를 增大시키거나 下流側에 별도의 Ramp를 추가로 설치하여 全 區間에서 충분한 濃도가 확보 되도록 해야 한다. Flip bucket 지점에서는 앞에서 說明한 이유로, 水路의 바닥面과 접하는 흐름의 아래部

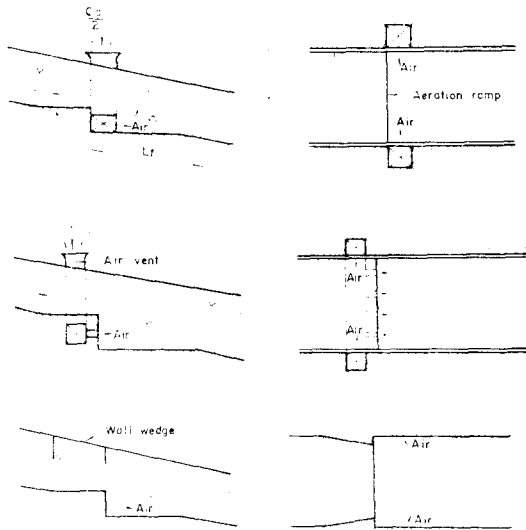


그림-9 給氣 裝置의 型式

分の 공기 濃度가 급격히 떨어지게 되므로 Flip bucket 減勢工을 설치하는 경우는 Bucket 直前에서 25% 이상의 濃度가 유지 되도록 해야만 Bucket의 射出端 지점에서 기준 濃度가 확보될 수 있다. 境界層이 水表面에 다다르고 나서 부터는 水表面을 통하여서도 공기 混入이 이루어 지지만 設計에서는 이를 무시한다.

(7) 給氣管은 設計 流量의 조건에서 공기 流速이 50m/s 以內에 들도록 그 규모를 결정한다.

(8) 給氣 장치의 型式은 일반적으로 그림-9와 같은 형태를 취할 수 있다.

5. 設計例

(1) 設計 條件

設計 流量: $Q = 1,800m^3/s$

設計 水位: $HWL=510.0m$

餘水路 폭: 20m

餘水路 경사(α): 20°

給氣 Ramp 지점의 水路 바닥고: $El. p = 490.0m$

給氣 Ramp 지점의 위치: 웨어 곡선 始点으로부터 60m

단, 위의 設計條件 中 Ramp 설치 위치는 水理 계산의 例를 제시하기 위하여 임의로 選定한

것이며, Cavitation에 대한 검정은 생략한다.

(2) 水理 계산

a. Boundary Layer Thickness(Ramp 지점)

$$\delta = 0.08 L \left(\frac{L}{K}\right)^{-0.233} \text{ (참고문헌 4)}$$

式에서, δ = Boundary layer thickness

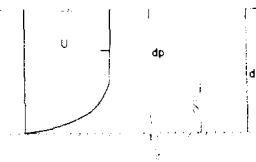
L = 웨어 곡선 始点으로부터의 거리 (60m)

K = 水路 表面의 粗度 (콘크리트의 경우 0.6mm)

$$\delta = (0.08) (60) \left(\frac{60}{0.0006}\right)^{-0.233}$$

$$= 0.33m$$

b. Potential Flow Depth (dp)



U : potential flow velocity

dp : potential flow depth

d : actual flow depth

δ : boundary layer thickness

δ_1 : displacement thickness (0.18 δ)

境界層(δ)의 영향에 의한 水路 바닥의 가상적인 上向이동(δ_1)을 고려하면,

$$HWL - El. p = dp \cos \alpha + \frac{U}{2g}$$

$$510.0 - 490.0 = 0.94dp + \frac{(1800)^2}{(2)(9.8)(20 \times 0.94dp)^2}$$

윗 式을 풀면, $dp = 5.64m$

$$A = (5.64)(20) = 112.8m^2$$

$$U = \frac{1800}{112.8} = 15.96m/s$$

c. Depth of flow (d)

$$d = dp + \delta_1$$

$$\delta_1 = 0.18\delta \text{ (참고문헌 4)}$$

따라서 Ramp 지점(p)에서의 水深(d)은

$$d = 5.64 + (0.18)(0.33)$$

$$= 5.70m$$

d. 공기량 계산

$$Q_a = 0.025 \cdot V \cdot L \cdot W$$

단, $L_t=18\text{m}$ (水理 模型 실험등으로 결정되는 값이며, 여기서는 假定值)

$$W=20\text{m}$$

$$V = \frac{1800}{(5.70)(20)} = 15.79\text{m/s}$$

$$\text{공기량}(Q_a) = 0.025 (15.79) (18) (20) = 142.1\text{m}^3/\text{s}$$

e. Ramp 지점의 공기 濃度 Boundary layer 의 流量(Q_w)은

$$Q_w = \left(\frac{0.33}{5.70}\right)(1800) = 104.2\text{m}^3/\text{s}$$

$$\begin{aligned} \text{공기 混入 濃度} &= \left(\frac{Q_a}{Q_a+Q_w}\right)(100) \\ &= \left(\frac{142.1}{142.1+104.2}\right)(100) \\ &= 58\% \end{aligned}$$

f. Flip Bucket 始点(El. 460.0)의 공기 濃度

$$dp=3.15\text{m}(\text{계산과정 생략})$$

$$L=148\text{m}$$

$$\delta = (0.08) (148) \left(\frac{148}{0.006}\right)^{-0.233} = 0.66\text{m}$$

$$d = 3.15 + (0.18) (0.66) = 3.27\text{m}$$

$$Q_w = \left(\frac{0.66}{3.27}\right) (1800) = 363.0\text{m}^3/\text{s}$$

$$\begin{aligned} \text{공기 濃度} &= \left(\frac{142.1}{142.1+363.0}\right) (100) \\ &= 28.1\% > 25\% \end{aligned}$$

(3) Air Vent 의 設計

그림-9와 같이 水路의 左右에 각각 Air vent 를 설치할 경우 1個所에서 공급하게 될 공기량은 $Q_a/2$ 가 된다.

$$\begin{aligned} Q_a/2 &= 142.1/2 \\ &= 71.1\text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

設計 流速을 50m/s로 하면 필요한 斷面積(A_a)은,

$$\begin{aligned} A_a &= 71.1/50 \\ &= 1.42\text{m}^2 \end{aligned}$$

직경 1.4m의 圓形 단면을 채택할 경우

$$A = (\pi) (1.4)^2/4$$

$$= 1.54\text{m}^2$$

$$\begin{aligned} V_a &= 71.1/1.54 \\ &= 46\text{m/s} < 50\text{m/s} \end{aligned}$$

(4) Jet 下部의 眞壓 檢證

- a. 入口의 Grating 에 의한 損失 : 0.1hv
- b. 入口 損失 : 0.8hv
- c. 판곡 損失 : 0.6hv
- d. 出口 損失 : 1.0hv
- e. 마찰 損失(Vent 높이를 8.0m 라고 假定)

$$\begin{aligned} hf &= \frac{(124.6)(n^2)(L)}{D^{4/3}} (hv) \\ &= \frac{(124.6)(0.014)^2(8.0)}{(1.4)^{4/3}} (hv) \\ &= 0.12\text{hv} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{總損失} &= (0.1+0.8+0.6+1.0+0.12)hv \\ &= (2.62) \left[\frac{(46)^2}{(2)(9.8)} \right] (0.0012) \\ &= 0.34\text{m 水頭} < 2\text{m} \end{aligned}$$

6. 맺는 말

高流速을 갖는 水理 구조물에 대한 Cavitation 의 발생 가능성의 檢證 및 Cavitation 損傷을 방지하기 위한 給氣 장치의 設計 절차를 제시하였다. 댐의 餘水路와 같은 急傾斜 水路의 경우 落差 30m 정도에서 水路 끝단의 流速이 20m/s 이상 이 되기 때문에 이러한 落差 규모 以上の 餘水路에는 給氣 장치를 설치하는 것이 有利하다. 댐의 建設 단계에서 給氣 장치를 설치할 경우 특별히 工事費를 증가 시키지 않고 설치할 수 있으며, 完工後 Cavitation 損傷에 의한 구조물의 維持 補修費를 절감할 수 있기 때문에 給氣 장치는 Cavitation 에 대비한 가장 손쉽고 經濟 的인 解決策이라고 할 수 있다.

참고 문헌

- 1) Rex A. Elder: "Advances in Hydraulic Engineering practice: The Last Four Decades and Beyond", Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol.112, No.2, 1986.
- 2) James W. Ball: "Cavitation from Surface Irregularities in High Velocity", Journal of the Hy-