

急速濾過池의 濾過速度와 濾材構成의 研究

—濾過抵抗을 中心으로—

A Study on the Velocity, the Grain Size and the Bed Depth of the Rapid Filter

姜 龍 太
Kang, Yong Tai

Abstract

In spite of extensive knowledge of the surface chemistry and the transport mechanism in filtration systems, there is still insufficient understanding of the physical characteristics of suspensions and the system components. Because of this, no filtration mechanisms are mathematically generalized to the full extent.

The purpose of this paper is to propose experimental equations for the filtration process using the tracer study in filter layer.

Some of results are as follows.

(1) The Volume of the specific deposit (σ) in filtration was directly measurable using the tracer study without interrupting the filtration.

(2) It was also confirmed that the head loss in filtration was greatly influenced by the micro-air babbles.

(3) The correction coefficient(f) was introduced into the Kozeny-Carman equation in order to apply it for the clogging filter media.

The coefficient(f) was experimentally obtained.

The total head loss of the filter media is given by next equation.

$$\frac{h}{h_0} = \frac{1}{L} \int_{z=0}^{z=L} f(\sigma) g(\varepsilon_0, \sigma) dz$$
$$f = a \exp(-b\sigma)$$

The above equation was applicable without regard to the variation of the suspension concentration, the filter medium diameter, the filter depth, the filtration velocity, and the amount of aluminum in all continuous filtration experiments.

(4) The total head loss was graphically generalized assuming mathematical filtration models I II (see fig. 7, 8)

(5) The total head loss was obtained from the filtration model in the field filtration conditions. (see fig. 9, 10)

*正會員 · 東亞大學校 工科大学 土木工學科 副教授

要 旨

지금까지 발표되어 있는 濾過工程의 數學的 解析의 結果는 汎用性이 없고 實用的으로 利用될 수 없는 問題點이 있었다. 그러나 濾過工程을 數學的으로 表現하는 것은 裝置設計上 대단히 중요하기 때문에 本論文은 急速濾過池의 濾過工程을 解明하기 위하여 濾層內의 tracer study의 結果를 정리한 것이다. 따라서 濾過工程을 解明하기 위해서 最大의 問題點으로 되어 있던 抑留物比堆積量을 直接 把握하는 것에 의해 Kozeny-Carman 式을 補正하여 실제에 活用될 수 있는 微小濾層의 濾過抵抗式을 誘導하였다. 또 阻止率과 比堆積量과의 相關 model을 提案하고 이것을 利用해서 濾過方程式을 풀고 그 값을 誘導한 濾過抵抗式에 對入하여 全濾層의 濾過抵抗을 求하고 그 結果를 對數化함으로서 濾過抵抗式을 理論과 實用 兩面に 넓게 活用될 수 있도록 하였다.

1. 序 論

濾過工程은 原水水質, 凝集劑의 注入量, 濾過速度, 濾材粒徑, 形成된 floc의 狀態等 數式에 代入해야 하는 變數가 대단히 많기 때문에 지금까지 提案되어온 式은 실제의 濾過池의 設計에 적용될 정도로 一般的으로 나타낼 수 없다. 따라서 濾過池를 設計하기 위해서는 過去의 經驗值에 의하는가 變數를 決定하기 위한 pilot plant 實驗을 行하지 않으면 안된다. 특히 現在에 사용되고 있는 濾過池는 單層濾過池뿐만 아니라 複層濾過方式을 취할 때도 있고 原水의 種類에 의한 여러 가지 變法도 사용되고 있다. 이와 같은 경우에는 경험이나 實驗 data가 충분하다고는 할 수 없다. 本 研究에서는 이러한 濾過工程을 解決하기 위해 最大의 問題點으로 되어 있던 抑留物比堆積量을 直接 把握하고 濾層內 抑留物 model을 實際에 가장 適合하도록 考案하여 濾過抵抗式으로서 Kozeny-Carman⁽¹⁾ 式을 補正한 濾過抵抗式을 誘導하여 이러한 問題點을 解決하는데 중점을 두었다.

2. 濾過에 관한 理論과 研究

濾過池의 濾過工程을 數學的으로 나타낼 경우 除去能力을 나타내는 것과 貯留能力을 나타내는 것이 必要하다. 前者를 주로 하여 表現하는 것이 濾過方程式이고 後者를 주로 하여 나타내는 것이 濾過抵抗式이다.

2.1. 濾過方程式

濾過方程式은 請澄化方程式, 連續方程式, 濾過係數 λ 를 나타내는 式 등 3式으로 成立되고 각각 다음과 같이 나타내진다.^(2,3,4)

$$\frac{\partial c}{\partial z} = -\lambda c \quad (1)$$

$$\frac{\partial c}{\partial z} = -\frac{1}{v} \frac{2\sigma}{2t} \quad (2)$$

$$\lambda = \lambda(\sigma) \quad (3)$$

단, c : 懸濁物濃度 [m³/m³]
 σ : 比堆積量 [m³/m³]
 z : 濾層두께 [m]
 v : 濾過速度 [m/s]
 t : 濾過時間 [s]
 λ : 阻止率 [m⁻¹]

2.2. 濾過抵抗

濾過抵抗에 관한 研究는 Darcy⁽⁵⁾ (1856)를 선두로 Hazen⁽⁶⁾, Miller⁽⁷⁾, Fair⁽⁸⁾, Hulbert Feben⁽⁹⁾, Fair-Hatch⁽¹⁰⁾의 共同研究, Hatch⁽¹¹⁾ 및 Rose⁽¹²⁾ 등 많은 研究者에 의해 行해졌다. 그러나 濾過抵抗을 濾材粒子의 空隙比에 函數로서 나타낸 것은 Kozeny⁽¹³⁾(1925)이고 그 후로는 Kozeny 式을 기초로 하여 濾過抵抗式이 많이 유도되어져 있으나 實用되지 못하고 있다. 이와 같이 지금까지 제안되어져 있는 식으로부터 여과저항식을 일반적으로 나타내지 못하고 있는 것은 해석적으로 풀기 어려운 것도 한 원인이 있겠으나 가장 큰 장애는 현탁물 농도가 일반적

으로 용적비가 아니고 질량비로서 제량되기 때문이다. 이 때문에 양자를 환산하기 위해서는 수화 flocc 중의 입자단위체적 중의 탁도성분의 질량으로 정의 되어지는 환산係數(W)를 導入할 필요가 생긴다. 前處理로서 凝集작용을 할 경우 환산係數(W)의 값은 조건에 따라서 크게 변하고 測定도 용이하지 않다. 이것이 濾過抵抗의 數式化를 어렵게 하는 큰 원인으로 되어 있다. 本 研究에서는 抑留物 比堆積量을 tracer-study에 의해 直接 測定하는 것에 의해 이 問題를 解決했다.

3. 實驗方法

實驗條件은 濾過速度, 濾材粒徑, 濾層두께, 藥品注入率, 原水水質 等の 조건을 바꾸어가면서 연속濾過實驗을 행하였다. 소경의 수온에서 충분히 교반하여 기포를 뺀 水道水에 kaoline 50~30 mg/l 을 첨가하고 濃度가 一定하게 되도록 原水 濁質槽內에서 교반하면서 그림 1 과 같은 여과장치를 이용하여 定量 pump로서 原水を 原水分配槽로 注入한다. 混合된 kaoline 凝集水는 原水分配槽에서 2분정도 急速 교반한 후

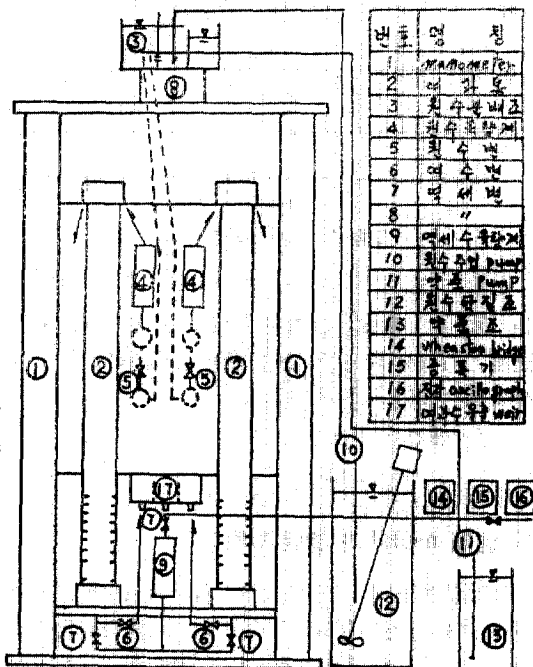


그림 1. 실험장치

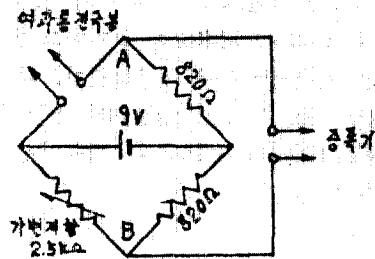


그림 2. Wheatson bridge

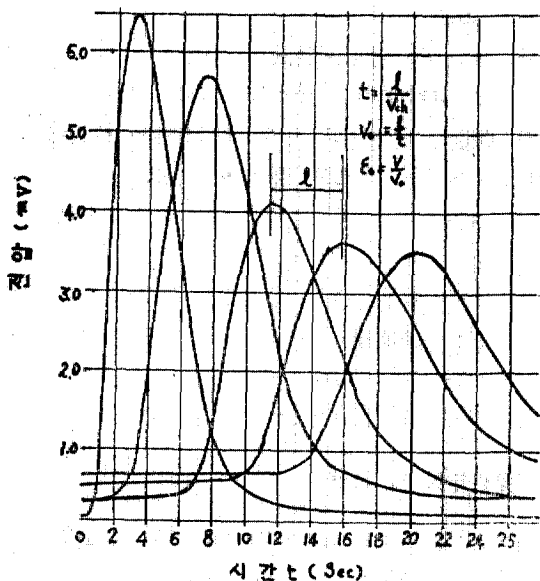


그림 3. Oscillograph 파형의 출력예

소경량 여과통에 導入된다. 여과통은 內徑 40 mm의 acryl 等으로서 濾層間隙內의 平均流速을 測定하기 위하여 濾過筒 內부의 측면에 길이 2 cm 간격으로 stainless 製의 電極棒을 組立한 wheatson-bridge(그림 2)를 平行시켜 둔다. tracer로서 NaCl 용액을 사용했고 tracer가 진극을 통과하면 電導度가 상승하고 bridge에 비 平行 電류가 발생하기 때문에 이것을 電子 oscillograph로서 기록하면 그림 3과 같은 波型이 얻어진다. 따라서 oscillograph에서 기록되어진 波型의 時間間隔에 의해 그 濾層部分의 流下時間이 求해지고, 間隙內 實流速이 計算된다. 濾過層 內面的 電極의 反對側에는 濾過抵抗을

測定하기 위해 manometer가 설치되어 있다. 濾過筒 出口는 濾過水 流出 weir가 接續되어져 있다. 流出 weir는 定水位를 유지하고 濁度 pH, alkalinity, 濾過速度 등을 측정하였다. 따라서 濾層間隙內의 實流速 v_0 는 濾層內의 上下 電極間의 測定區間長(l_0)와 tracer의 체류시간(t)으로 부터 求할 수 있다.

$$t = l/v_{ch} \quad (4)$$

단, l : oscillo-graph peak間 距離 (m)

v_{ch} : " 用紙의 流速 (m/s)

그러므로 濾層內 實流速(v_0)는 다음과 같다.

$$v_0 = l_0/t \quad (5)$$

단, l_0 : 上下 電極區間長 (m)

t : tracer의 체류시간 (s)

또한 濾層內 實流速이 求해지면 空隙比 및 比堆積量(σ)는 다음 식으로 求할 수 있다.

$$\varepsilon = v/v_0 \quad (6)$$

上記式中

ε : 空隙比(-)

v : 濾過速度

$$\sigma = \varepsilon_0 - \varepsilon = \varepsilon_0 - v/v_0$$

단, ε_0 은 初期空隙比(-)

4. 實驗結果 및 考察

閉塞濾層에서 Kozeny-Carman 式이 成立한다고 가정하면 다음 式이 成立한다.

$$\frac{h}{h_0} = \frac{k'}{k_0} \left(\frac{\phi_0 D_0}{\phi D} \right)^2 \left(\frac{1 - \varepsilon_0 + \sigma}{1 - \varepsilon_0} \right)^2 \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_0 - \sigma} \right)^3 \quad (7)$$

h : 閉塞濾層의 濾過抵抗 [m]

k' : 閉塞濾層의 濾過抵抗係數 [-]

ϕ : 閉塞濾層의 濾材形狀係數 [-]

D : 閉塞濾層의 濾材粒徑 [m]

σ : 比堆積量 [-]

그러나 上式中 k', D, ϕ 가 σ 에 의해 不變이라고 하여 上記式을 圖示하면 그림 4로 되고 實驗値와는 현저하게 다르다. 이 問題點을 解決하기 위해서 $f = \frac{k_0}{k'} \left(\frac{\phi_0 D_0}{\phi D} \right)^2$ 라 두고 f 를 比堆積量(σ)의 함수로 간주하여 濾過抵抗 補正係數 f 를 數式化하였다. 이 f 와 實測되어진 값과의 關係를 나타낸 것이 그림 5이다.

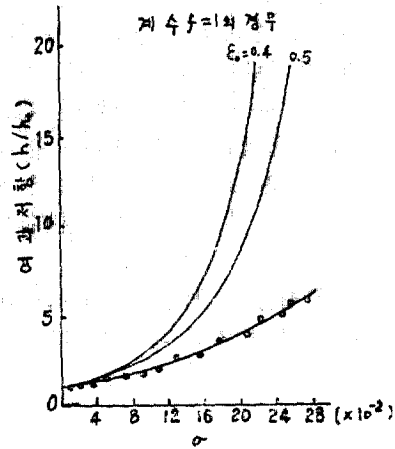


그림 4. 여과저항

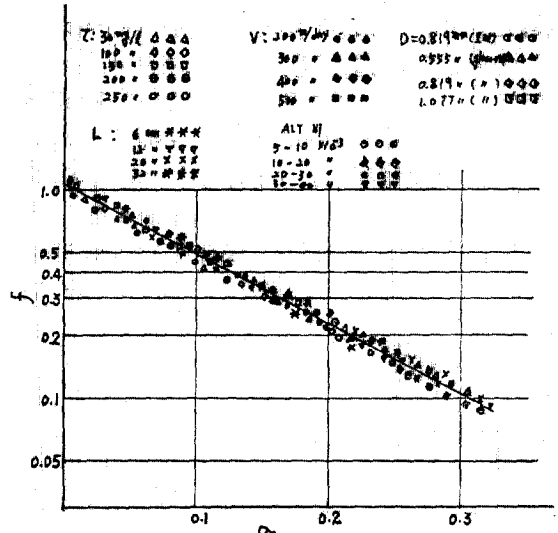


그림 5. f 와 σ 와의 관계

그림 5로부터 알 수 있는 바와 같이 f 의 값은 濁質의 濃度, 濾材의 粒徑, 濾層두께, 濾過速度, 凝集劑의 注入量의 變化에 關係없이 다음 式이 成立됨을 알 수 있다.

$$f = a \exp(-b\sigma)$$

$$a = 1.07, b = 7.76$$

5. 濾過 model과 濾過方程式

濾過方程式을 完成시키기 위해서는 單입자층 제거효율($\eta = \lambda \phi D$)의 함수형을 결정하지 않으면 안된다. 본 研究에서는 σ 의 變化만을 고려한 model I, II를 이용했다. 즉, $\sigma=0$ 에서 $\eta = \eta_0$

$\sigma_s = \varepsilon_0 - \varepsilon_s$ 에서 $\eta = 0$ 단 $\varepsilon_s =$ 포화空隙比, $\eta - \sigma$ 의 함수군 중에서 $(\eta_0, 0)$ 및 $(0, \varepsilon_0 - \varepsilon_s)$ 의 2점을 통과하고 비교적 간단한 함수는 그림 6이다.

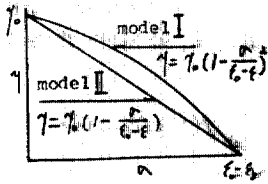


그림 6. 여과모형

따라서 濾過 model 를 사용해서 濾過方程式을 풀고 澄清化 方程式 (1)식 및 연속 方程式 (2) 식을 $\xi = \frac{z}{\phi D}$, $\theta = \frac{\tau_0 vt}{w \phi D}$ 라 두어 無次元化 하면 다음과 같이 나타내 진다.

model I의 경우

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right) = -\eta \cdot \frac{\tau}{\tau_0} = -\eta_0 \left(1 - \frac{\sigma}{\varepsilon_0 - \varepsilon_s} \right)^2 \cdot \frac{\tau}{\tau_0} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} &= -\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right) = \eta_0 \cdot \frac{\tau}{\tau_0} \\ &= \eta_0 \left(1 - \frac{\sigma}{\varepsilon_0 - \varepsilon_s} \right)^2 \cdot \frac{\tau}{\tau_0} \end{aligned} \quad (9)$$

上式은 解析解를 求하는 것이 곤란하기 때문에 수치적으로 풀었다. 이때 초기 條件 및 境界條件은 $\theta = 0$ 에서 $\sigma = 0$, $\xi = 0$ 에서 $\tau/\tau_0 = 1$

model II의 경우는 解析解에 의해 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \frac{\exp \frac{\eta_0 \theta}{\varepsilon_0 - \varepsilon_s}}{\exp(\eta_0 \xi) + \exp \frac{\eta_0 \theta}{\varepsilon_0 - \varepsilon_s}} \quad (10)$$

$$\frac{\alpha}{\varepsilon_0 - \varepsilon_s} = \frac{\exp \frac{\eta_0 \theta}{\varepsilon_0 - \varepsilon_s} - 1}{\exp(\eta_0 \xi) + \exp \frac{\eta_0 \theta}{\varepsilon_0 - \varepsilon_s}} \quad (11)$$

6. 全濾層의 濾過抵抗

全濾層의 濾過抵抗을 求하기 위해서는 微小濾層의 濾過抵抗式을 濾層全體에 관해서 積分하여 求한다. 즉, 濾過抵抗은 抑留物 比堆積量(σ)에 의해 變하고 抑留物 比堆積量(σ) 값은 濾層 두께 및 時間의 함수이기 때문에 濾過方程式을 풀어

서 求한 σ 의 값을 微小 濾層의 濾過抵抗式에 對入하여 積分을 實行한다.

$$\begin{aligned} h &= \int_{z=0}^{z=L} dh \\ &= h_0/L \int_0^L f \cdot \left(\frac{1 - \varepsilon_0 + \sigma}{1 - \varepsilon_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_0 - \sigma} \right)^3 \cdot dz \end{aligned} \quad (12)$$

但, $f = 1.07 \exp(-7.76 \sigma)$

濾過抵抗을 無次元으로 나타내기 위해서 (8) 式을 변형하면

$$h/h_0 = \frac{1}{L} \int_{z=0}^{z=L} f(\sigma) \cdot g(\varepsilon_0, \sigma) dz \quad (13)$$

(9) 式을 model I, II에 의해 計算한 結果가 그림 7, 8이다. 이처럼 $\xi = \frac{z}{\phi D}$ 및 $\theta = \frac{\tau_0 vt}{w \phi D}$ 의

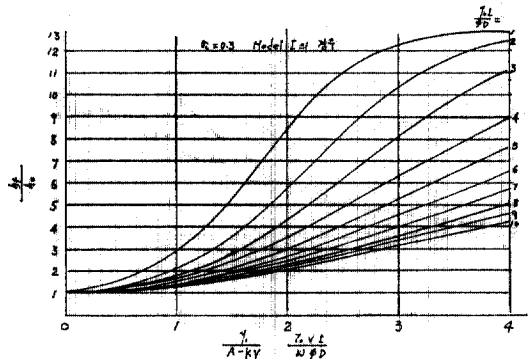


그림 7. 전 여과 저항의 시간적 변화

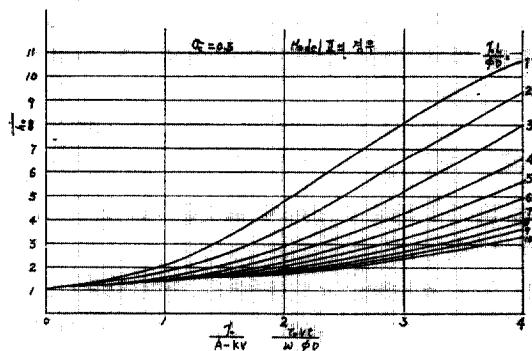


그림 8. 전 여과 저항의 시간적 변화

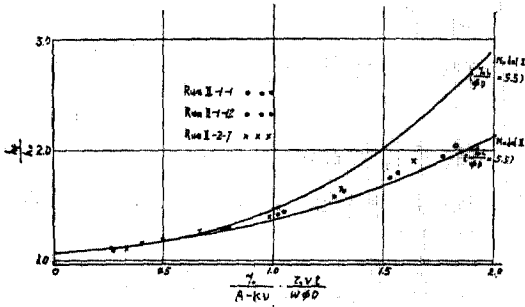


그림 9. 전 여과 저항의 시간적 변화

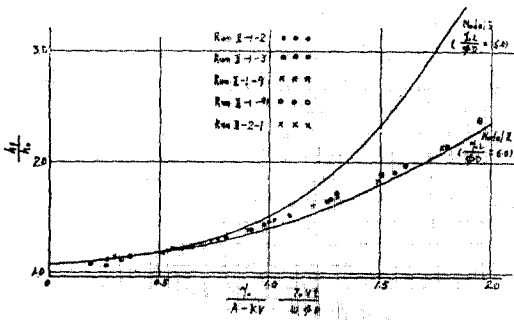


그림 10. 전 여과 저항의 시간적 변화

無次元 parameter 를 사용하면 全濾層의 濾過抵抗과 澄清濾層의 濾過抵抗比 h/h_0 를 일반적으로 圖表에 나타낼 수 있다. 그림 9, 10은 각 實驗條件에 의한 連續 濾過實驗 結果를 Plot 한 것이고 이것으로부터 알 수 있는 바와 같이 實測值가 model I 과 model II 의 사이에 있고 기포의 영향을 받지 않는 大部分의 Run 에서는 model II 에 가깝다.

7. 結 論

本 研究에 의해서 얻어진 結果를 정리하면 다음과 같다.

1) 종래 比堆積量 σ 의 測定은 困難하다고 되어 있었지만 tracer-study 에 의해 濾過를 繼續하면서 容積比(m^3/m^3)로서 測定할 수 있도록 되었다.

2) 濾過抵抗에 관해서는 氣泡의 影響이 대단히 큰 것(初期空隙比 ϵ_0 의 5~10%)을 tracer-study 에 의해서 잘 알 수 있다.

3) 閉塞濾層의 濾過抵抗式에 Kozeny-Carman 式을 適用하기 위하여 濾過抵抗 補正係數 f 를 導入하고 實驗的으로 이 값을 求하여 濾過抵抗 式을 誘導했다.

$$h/h_0 = \frac{1}{L} \int_{z=0}^{z=L} f(\sigma) g(\epsilon_0, \sigma) dz$$

$$f = a \exp(-ba)$$

上式은 濁質濃度, 濾材粒徑, 濾層厚, 濾過速度, 藥品注入量의 變化에 關係없이 成立하는 것을 連續濾過實驗으로부터 確認했다.

4) 濾過 model I, II 를 使用하여 濾過方程式을 풀이하고 tracer-study 에 의해 測定된 比堆積量 σ 를 補正된 濾過抵抗式에 代入하여 全濾層의 濾過抵抗式을 求한 結果 실제의 濾過池에서는 model II 에 의한 것이 適合한 것을 알 수 있다.

5) model II 에 의한 그림 7, 8 을 使用해서 실제의 濾過池에서 濾材構成比와 單粒子層 除去效率의 積($\gamma_0 L / \phi D$) 및 無次元時間($\tau_0 w t / w \phi D$)로부터 濾過抵抗比를 求할 수 있다.

參 考 文 獻

1. 白井隆, "流動層" 科學技術, 1965.
2. 藤田賢二, "急速濾過池의 設計에 關する 研究" 東京大學學位論文, 1976.
3. 藤田賢二, "急速濾過工程의 數學的表現(I)" 水道協會雜誌, No. 510 (1977).
4. K.J. Ives, "Progress in Filtration," *Journal, A.W.W.A. Vol. 51, No.9*, 1959.
5. I. Sholji and K.J. Ives, "Research on Variables Affecting Filtration," *Proc. ASCE, Jr. Sanitary Engineering Div.* 91, SA4, T, 1965.
6. G.M. Fair and J.C. Geyer, "Water Supply and Waste Water Disposal," John Wiley and Sons, Inc. 1956.
7. C.N. Miller, "An Aproximate Formula Calculating the Discharging Capacity of Rapid Sand Filter Wash Water Through," in *Water Purification* edited by J.W. Ellms 1940.
8. G.M. Fair and J.C. Geyer, "Water Supply and

- Waste Water Disposal,* John Wiley and Sons. Inc. 1956.
9. R. Hulbert and D. Feben, "Hydraulics of Rapid Filter Sand," *J.A.W.W.A. Vol. 25, No.1*, 1933.
 10. G.M. Fair and L.P. Hatch, "Fundamental Factors Governing the stream Line Flow of Water Through Sand," *J.A.W.W.A. Vol. 25, No. 11*, 1933.
 11. L.P. Hatch, "Flow Through Granular Media," *Applied Mechanics Vol. 7, No.3*, 1940.
 12. H.E. Rose, "An Investigation into the Laws of Flow of Fluids Through Beds of Granular Materials," *Proc. Inst. Mech. Engrs. Vol. 153*, 1945.
 13. 1 과 같음.

(接受: 1983. 3. 26)