

曝氣生物膜 濾過池의 濾過抵抗에 관한 研究

Study on Head Loss in Aerated Biofilm Filtration Reactor

姜龍太* · 玄吉秀**

Kang, Yong Tae · Hyun, Kil Soo

Abstract

The purpose of this research, through kinetic analyses and pilot plant experimentation of biofilm filtration reactor, is to study the theoretical equation of head loss in the Biofilm Reactor.

The Head loss in the biofilm reactor has occurred due to the biofilm growth and the adhesion to the media surface and stagnation of upflow air bubble, which have caused the pore spaces to become smaller.

On a basis of the head loss theory of sand filtration, therefore, the following equation of head loss for the biofilm reactor was proposed from this research results and proved to be possible to apply the equation for practical design of the biofilm filter.

$$h = \frac{h_0}{L} \int_0^L 0.58 \exp[-4.5(\sigma_B)z] \left[\frac{1 - \epsilon_0 + (\sigma_B)z}{1 - \epsilon_0} \right]^2 \left[\frac{\epsilon_0}{\epsilon_0 - (\sigma_B)z} \right]^3 dz$$

here $\sigma_B = 0.130 + 0.001 \theta$

要 旨

본 연구는 砂濾過池에 대한 濾過抵抗理論을 기초로 하여 曝氣生物膜 濾過池의 여과저항이론을 究明하는 것이다. 濾過抵抗에 크게 영향을 미치는 인자로는 사여과지의 경우 주로 현탁성 부유물질인 반면에 폭기생물막 여과지의 경우는 濾層내의 濾材표면에 부착된 微生物膜의 增殖과 SS성분의 부착 그리고 상승하는 氣泡의 정체 등이 여층내의 濾材間隙을 閉塞시킴으로서 濾過抵抗을 발생시킨다. 이러한 영향 인자들을 砂濾過抵抗 理論에 접목시킨 결과 曝氣生物膜 理論式을 도출할 수 있었다.

따라서 본 연구에서 제안된 폭기생물막 여과저항 이론식을 pilot plant를 통한 水處理實驗 결과 이론치와 실험치가 잘 일치함을 보임으로서 실제 濾過池 설계시 적용가능함을 알 수 있었다.

1. 序 論

濾過工程은 크게 上水의 淨水過程에서 현탁성 부

유물질이나 오염물질을 제거하기 위해 응집제의 주입으로 생기는 floc 등을 제거하는 砂濾過工程과, 유기물이나 SS성분 등을 생물학적 처리에 의해 제거하는 生物膜 濾過工程으로 나누어 진다.

砂濾過池에 대한 濾過抵抗에 관한 研究는 1856년

* 정희원 · 東亞大學校 土木工學科 教授
 ** 정희원 · 東亞大學校 土木工學科 講師

Darcy를 시작으로 Miller⁽¹⁾, Fair⁽²⁾, Hulbert와 Feben⁽³⁾, Fair와 Hatch⁽⁴⁾, Hatch⁽⁵⁾ 그리고 Rose⁽⁶⁾ 등의 여러 연구자에 의해 행해졌다.

그러나 여과저항을 濾材粒子的 空隙比의 함수로 나타낸 것은 Kozeny⁽⁷⁾이고 그 후로 Kozeny식을 기초로 하여 여과저항식들이 유도되었으나 이들 식들은 현탁물 농도를 일반적으로 容積比가 아닌 質量比로서 計量했기 때문에 질량으로 정의되는 換算係數(W)를 도입하여 抑留物 比堆積量을 tracer-study에 의해 직접 측정하는 것에 의해 실용적인 濾過抵抗식을 도출하였다.

따라서 본 연구에서는 생물막 여과반응조에 있어서 유기물의 섭취에 의한 미생물막의 과다한 증식 및 수중의 SS 등이 濾材 間隙을 폐색시키므로서 발생하는 여과저항에 대하여 砂濾過抵抗 理論⁽⁸⁾을 기초로 하여 이에 生物膜 理論⁽⁹⁾을 도입한 曝氣生物膜 濾過反應槽에 대한 濾過抵抗理論을 究明하고자 한다.

2. 曝氣生物膜 濾過反應槽의 濾過抵抗 理論

砂濾過的 閉塞濾層에서 Kozeny-Carman式⁽¹⁰⁾이 成立한다고 가정하면 閉塞濾層의 濾過抵抗식은 다음 식으로 표시된다.

$$\frac{h}{h_0} = \frac{k'}{k_0} \left(\frac{\phi_0 D_0}{\phi D} \right)^2 \left(\frac{1 - \epsilon_0 + \sigma}{1 - \epsilon_0} \right) \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_0 - \sigma} \right) \quad (1)$$

- h_0 : 초기 濾過抵抗(mm)
- h : 濾過 개시 후의 濾過抵抗(mm)
- k_0 : 초기의 濾過抵抗係數(-)
- k' : 濾過 개시 후의 濾過抵抗係數(-)
- ϕ_0 : 초기의 濾材 形狀係數(-)
- ϕ : 濾過 개시 후의 濾材 形狀係數(-)
- D_0 : 초기의 濾材
- D : 濾過 개시 후의 濾材粒徑(mm)
- ϵ_0 : 초기 空隙率(-)
- σ : 閉塞濾層의 比堆積量(-)

그러나 실제의 濾過抵抗은 식(1)의 k' , ϕ , D 를 一定하다고 假定하였을 때 예상되는 값보다 훨씬 작은 값을 나타내었다.⁽¹¹⁾

이로 인하여 姜은 閉塞濾層에 Kozeny-Carman식을 적용하기 위하여 濾過抵抗 補整係數(f)를 도입하여

式 (1)에서 우변항 중의

$$\frac{k'}{k_0} \left(\frac{\phi_0 D_0}{\phi D} \right)^2 = f$$

라 두고 f 를 懸濁液 抑留物 또는 比堆積量(specific deposit, σ)의 함수로 간주하여 실험을 통한 濾過抵抗補整係數(f)와 比堆積量(σ)의 관계로부터 濾過速度, 濁質濃度, 濾材粒徑, 濾層두께 등의 변화에 관계없이 성립되는 식(2)과 같은 濾過抵抗補整係數식을 導出해냈다.⁽¹¹⁾

$$f = a \exp(-b \sigma) \quad (2)$$

f = 濾過抵抗補整係數(-)

a, b = 常數

式 (1)에 식 (2)의 濾過抵抗 補整係數식을 대입하여 微小濾層의 濾過抵抗식을 유도하면 다음 식이 된다.

$$\frac{\Delta h}{h_0} = f \left(\frac{1 - \epsilon_0 + \sigma}{1 - \epsilon_0} \right)^2 \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_0 - \sigma} \right)^3 \frac{\Delta Z}{L} \quad (3)$$

Δh = 濾過抵抗 增加分(mm)

ΔZ = 微小濾層 깊이(mm)

L = 전체 濾層 깊이(mm)

여기서 比堆積量(σ)는 다음 식에 의해서 주어진다.

$$\sigma = \epsilon_0 - \epsilon = \epsilon_0 - \frac{V}{V_r} \quad (4)$$

ϵ = 濾過 개시 후의 空隙比(-)

V = 濾過速度(m/day)

V_r = 濾層內的 實流速(m/day)

閉塞濾層의 濾過抵抗식을 生物膜 濾過 反應槽에 적용하기 위하여 물리적인 처리에 의해 濾材表面에 浮游物質이나 凝集에 의해 形成된 Floc 등이 堆積하므로써 발생하는 식 (3)의 우변항 중의 比堆積量(σ)에 微生物膜 增殖理論을 도입함과 아울러 上向流式으로 공기를 공급함으로써 발생하는 濾材의 間隙 사이에 체류하는 氣泡量을 고려해 볼 때 曝氣生物膜 反應槽內에서의 比堆積量(σ_B)에 대한 模式圖는 그림 1과 같이 된다.

그림 1을 토대로 生物膜 反應槽內에서의 比堆積量(σ_B)에 대해서 物質收支를 取하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

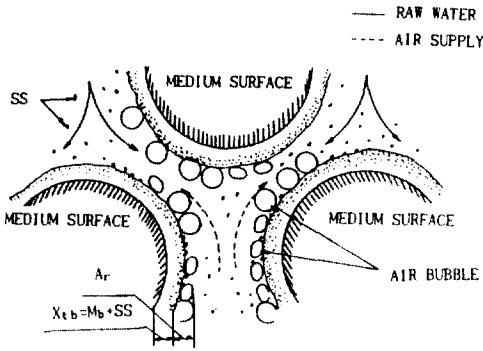


그림 1. Schematic Diagram of Specific Deposit Formation in the Biofilm Reactor

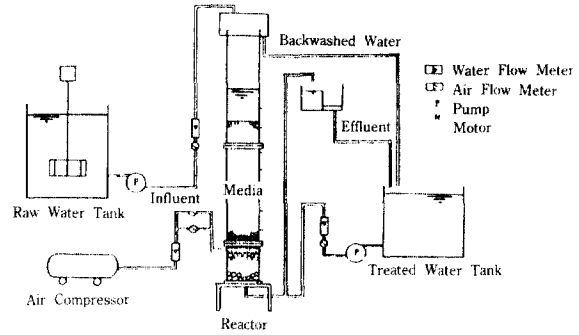


그림 2. Schematic Diagram of Biological Aerated Filtration Process

$$\left(\frac{\text{反應槽內的}}{\text{比堆積量}} \right) = \left(\frac{\text{基質消費로 인한}}{\text{微生物의 增殖量}} \right) + \left(\frac{\text{流入되는}}{\text{SS量}} \right) + \left(\frac{\text{濾材間隙 사이의}}{\text{氣泡滯留量}} \right)$$

이렇게하여 도출된 폭기생물막 濾層의 물질수지식인 (5)식에서 微生物膜의 增殖量(M_b)과 流入 SS量(TSS)을 X_{tb} (總 附着微生物量)라 두고 이를 식 (6)과 같이 無次元化시킴으로써 反應槽內的 比堆積量(σ_B)는 다음과 같은 單純式으로 나타내었다.

$$L_T = \frac{V_B - V_m}{V_M} \quad (6)$$

$$\sigma_B = L_T + A_r \quad (7)$$

V_B : 濾材를 포함한 附着微生物量의 전체 體積(m^3)

V_m : 濾材만의 體積(m^3)

V_M : 여층의 體積(m^3)

A_r : 濾材 間隙사이의 氣泡滯留率(-)

(= 上昇氣泡率 + 停止氣泡率)

L_T : 無次元 總微生物量(-)

σ_B : 曝氣生物膜 濾層의 比堆積量(-)

따라서 식 (3)에 식 (7)을 대입하여 정리하브호서 曝氣生物膜 濾過 反應槽의 微小濾層에 대한 濾過抵抗式을 다음과 같이 導出하였다.

$$\frac{dh}{h_0} = f \left[\frac{1 - \epsilon_0 + (\sigma_B)^2}{1 - \epsilon_0} \right]^2 \left[\frac{\epsilon_0}{\epsilon_0 - (\sigma_B)} \right]^3 \frac{dz}{L} \quad (8)$$

$$f = a \exp [-b(\sigma_B)] \quad (9)$$

微小濾層의 濾過抵抗式인 (8)式을 反應槽 전체에 대해서 積分하면 曝氣生物膜 濾過反應槽의 全濾過抵抗式이 주어진다.

$$h = \frac{h_0}{L} \int_0^L f \left[\frac{1 - \epsilon_0 + (\sigma_B)^2}{1 - \epsilon_0} \right]^2 \left[\frac{\epsilon_0}{\epsilon_0 - (\sigma_B)} \right]^3 dz \quad (10)$$

3. 實驗

3.1 實驗장치

본 연구에 사용된 曝氣生物膜 濾過裝置는 그림 2에 도시된 것과 같이 원수조, 원수정량공급장치, 반응조, 유량조절조 그리고 처리수 저류조 등으로 구성된다.

原水槽는 유효용량이 $1 m^3$ 인 $L1200 \times W1200 \times H1400$ mm의 크기로서 두께 10 mm의 투명 아크릴 판으로 제작하였고, 槽內 전체에 걸쳐 두루 균일한 기질농도를 유지시키기 위해 길이 800 mm 직경 10 mm의 스테인레스 材質의 강봉을 축으로 Paddle Wheel 형태로 양날개 모두 중심축으로 부터 120 mm 지점에 길이 150 mm 폭 20 mm인 아크릴 재질로 회전날개를 부착시켰다. 그리고 강봉끝에 감속모터를 연결하여 회전속도를 조절할 수 있도록 하였다.

反應槽의 크기는 내경 90 mm 높이 250 mm로서 투명아크릴판으로 제작하였으며 상부에 逆洗水 集水槽를 부착하여 역세수 유출구를, 하부에 처리수 유출구 및 역세수 유입구를 설치하고 반응조내 공

기의 분산이 잘 되도록 微細 多孔散氣管을 설치하였다. 또한 시료채취를 위하여 조 하부로 부터 20 cm간격으로 시료채취구를 6개 설치하였고, 濾過抵抗을 측정하기 위하여 압력계를 부착시켰다.

平均調和徑이 3.5 mm 비중(표면건조 포화상태)이 1.25인 세라믹 재질의 濾材를 사용하였으며, 반응조의 바닥으로부터 200 mm까지는 30~50 mm의 호박돌을, 그 위에 여재를 1500 mm의 높이로 충전시켰다. 이러한 조건은 생물막 여과반응조의 주요 설계변수들로서 최적조건을 적용하였다.⁽¹²⁾

반응조내의 수온을 일정하게 유지시키기 위하여 槽 둘레에 恒溫施設을 설치하였다.

3.2 실험 방법

본 실험에 사용된 원수는 姜 등⁽¹³⁾에 의해 개발된 하수처리공법인 FCS시스템의 처리수를 이용하여 실험조건의 변화에 따른 농도조절을 위해 수도수(지하수)를 稀釋水로서 원수의 농도를 조절하였고, 원수의 pH가 중성을 유지하도록 NaOH를 첨가하였다.

실험에 사용된 원수 수질 특성을 表 1에 나타내었다. 原水는 원수조내의 교반기를 3~5 rpm의 저속으로 회전시키면서 항상 일정한 농도의 원수를 반응조내로 주입시켰다.

원수를 조의 상부로부터 30~40 m/day의 유속으로 반응조로 下向流式으로 유입시킴과 동시에 曝氣速度 170~180 m/day로 공기를 공급하여 媒質표면에 미생물이 자연적으로 殖種되도록 하면서 처리수의 수질분석(COD, SS농도)을 통하여 正常狀態에 도달하였다고 판단이 되면 일정기간 동안 본 연구에 필요한 시료의 분석을 실시하고 최종적으로 반응조내의 미생물량을 측정하였다.

表 1. Wastewater Quality Characteristics

Parameter	Unit	Concentration
Temp.	℃	18~20
pH	-	6.9~7.2
TBOD	mg/l	30~148
Sol-BOD	mg/l	18~140
TCOD	mg/l	20~136
Sol-COD	mg/l	15~132
SS	mg/l	18~38

이때 반응조내의 微生物量은 反應槽의 하부로 부터 300 mm간격으로 설치된 시료채취구에 의해 5개 단으로 나누어서 각 단에서 濾材를 채취하여 濾材의 乾燥 後의 무게차로 하여 總 固形物量을 측정한다. 濾層의 閉塞으로 인하여 발생하는 濾過抵抗이 60 cm에 달했을때 역세를 행하였다.

본 연구에서 시료의 분석항목은 pH, TBOD, TCOD, SCOD, SS, 총고형물 그리고 휘발성 고형물로서 溶解性성분의 측정에는 Whatman 47 mm의 유리섬유 濾過紙(Glass Microfibre Filter 100 Circles, England)를 이용하였으며 대부분 Standard Method⁽¹⁴⁾ 및 日本 下水試驗法⁽¹⁵⁾에 준하여 실시하였다.

4. 結果 및 考察

曝氣 生物膜濾過 反應槽內에서 여과시간이 경과함에 따라 여재표면에 미생물막의 증식과 여과간극에 기포가 체류함으로 인하여 발생하는 濾過抵抗을 究明함과 동시에 본 연구에서 제안한 曝氣生物膜 여과반응조의 濾過抵抗式을 실제의 적용여부를 검토하기 위한 실험을 실시하였다.

먼저 식 (3)에서 濾過抵抗 補整係數 f값을 구하기 위하여 여과속도와 유입수 기질농도 및 濾層깊이의 변화에 따라서 여층내 미생물농도는 미생물량에 충전 濾材의 체적으로 나눈 값을 이용하였고, 微生物膜 두께는 실제로 정확히 측정하기란 거의 불가능하므로 다음과 같은 식을 이용하여 길보기 微生物膜 두께를 구하였다.

미생물막 두께 =

$$\frac{\text{미생물량/건조구체밀도/여층내 체적}}{\text{濾材의 比表面積}} \quad (11)$$

여기서 乾燥菌體密度는 菌體 단위체적의 질량(110 ℃에서 건조)인 17.5 mg/l로, 여재의 비표면적은 濾材를 球로 가정하여 $A_s = \pi/D$ 에 의하여 계산하였다.^(16,17)

여재의 初期空腔比(e_0)는 逆洗 後 반응조의 5개 단으로 부터 여재를 채취하여 메스실린더에 물을 일정량 넣고 거기에 기포가 발생하지 않도록 주의하면서 채취한 여재를 투입한다. 이때의 水面上昇에

메스실린더의 면적을 곱한 값인 微生物膜이 부착된 濾材의 純體積과 겉보기 체적(V)을 통하여 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\epsilon_0 = 1 - \frac{\Delta V}{V} \quad (12)$$

또한 반응조내의 滯留氣泡量은 그림 3에 도시된 결과로부터 曝氣에 의해 상승하는 氣泡量과 濾材間隙 사이에 滯留하는 停止 氣泡量을 더한 값인 0.07을, 초기여과저항(h_0)은 역세직후 처리수를 이용하여 약 30분간 여과시킨 후의 값을 측정하였다.

그리고 比堆積量 중 總微生物量은 여재를 球로 가정하여 식 (7)에 의하여 구하였다. 이들 값을 식 (4)에 대입시켜 계산한 값과 실측한 濾過抵抗으로부터 구한 여과저항 보정계수 f값을 이용하여 반대

수지에 X축에 比堆積量($L_T + A_r + \sigma_B$)을, Y축에 f값을 두고 그림 4에 나타내었다.

회귀 분석에 의해 구해진 직선으로부터 다음과 같은 曝氣 生物膜 濾過反應槽의 여과저항 보정계수 식을 얻을 수 있었다.

$$f = 0.58 \exp(-4.50 (\sigma_B)) \quad (13)$$

한편 比堆積量은 유입수의 氣質濃度, 濾過速度 및 濾過時間 등에 따라 변하므로 식 (13)중의 비퇴적량 (σ_B)을 식 (14)과 같은 무차원시간(θ)⁽¹¹⁾의 함수로 두므로써 생물막 여과반응조의 설계시 실제 적용이 가능하도록 하였다.

$$\theta = \frac{X_0 \cdot V \cdot T}{\omega \cdot \phi \cdot D} \quad (14)$$

X_0 : 유입수 SS농도 (mg/l)

T: 여과시간 (hr)

ω : 體積換算係數 (-)(슬러지의 질량/슬러지의 체적)

이때 體積換算係數(ω)는 연속 여과실험 종료후 逆洗排水중의 슬러지를 메스실린더에 넣어서 충분히 압밀시킨 후 체적을 측정하고 이를 105~110°C에서 2시간 건조시킨 후의 무게를 체적으로 환산하여 평균한 값인 9511.3 g/m³을 사용하였다.

따라서 무차원시간에 따른 比堆積量의 변화과정을 究明하기 위하여 실험결과를 식 (14)에 대입하여 계산한 값들을 도시하여 회귀분석을 해보면 그림 5의 직선으로부터 식 (15)와 같은 무차원시간과 비

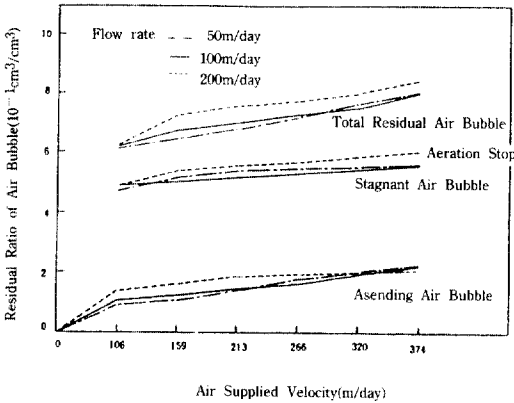


그림 3. Air Supplied Velocity VS. Pesidual Ratio of Air Bubble in Biofilm Reactor

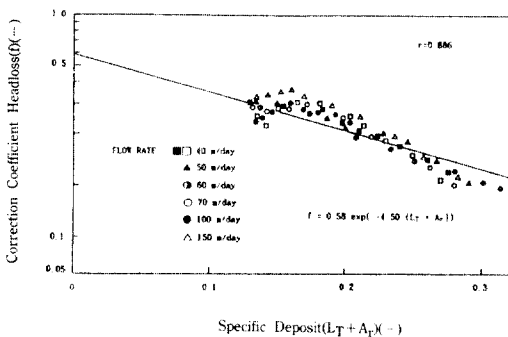


그림 4. Relationship between Correction Coefficient of Headloss and Specific Deposit

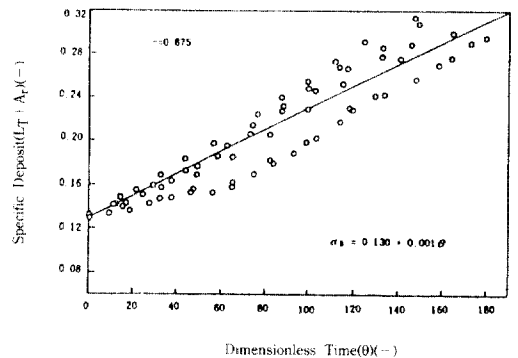


그림 5. Relationship between Dimensionless Time and Specific Deposit

표 2. Comparison of Experimental and Theoretical Values Calculated from Proposed Headloss Equation of Biofilm Filter at Flow Rate of 70 m/day

Influent Concentration; COD : 95-97 mg/l SS : 50-51 mg/l
Initial Porosity(ϵ_0)=0.420 Initial Headloss(h_0)=5.4 cm

Filtration Time(hr)	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	
θ	0	16.59	33.19	49.78	66.37	82.97	99.56	116.15	132.75	149.34	
h/h_0	Observed	1.00	1.68	2.57	3.24	3.91	4.54	5.40	6.20	7.30	9.46
	Calculated	1.52	1.77	2.10	2.45	2.94	3.60	4.46	5.67	7.40	9.98

표 3. Comparison of Experimental and Theoretical Values Calculated from Proposed Headloss Equation of Biofilm Filter at Flow Rate of 50 m/day

Influent Concentration; COD : 95-98 mg/l SS : 46-48 mg/l
Initial Porosity(ϵ_0)=0.425 Initial Headloss(h_0)=6.9 cm

Filtration Time(hr)	0	4	5	12	16	20	24	28	32	36	40	
θ	0	14.74	29.39	44.12	58.86	73.51	88.25	102.98	117.63	132.37	147.11	
h/h_0	Observed	1.00	1.10	2.13	2.57	3.04	3.56	4.12	4.81	5.56	6.40	7.47
	Calculated	1.50	1.71	1.96	2.26	2.64	3.11	3.81	4.51	5.54	6.97	8.99

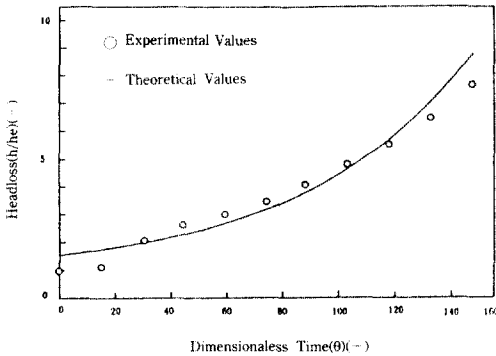


그림 6. Relationship between Headloss and Dimensionless Time at Flow Rate of 50 m/day with TSS of 46-48 mg/l

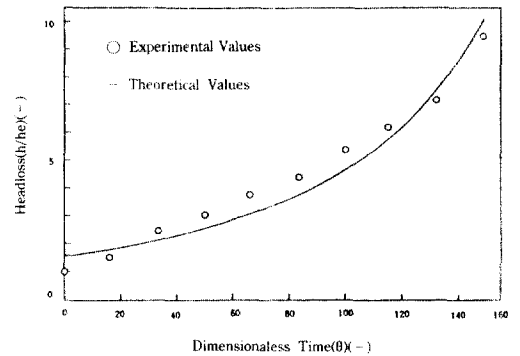


그림 7. Relationship between Headloss and Dimensionless Time at Flow Rate of 70 m/day with TSS of 50-51 mg/l

퇴적량의 관계식을 얻을 수 있었다.

$$\sigma_B = 0.130 + 0.001 \theta \quad (15)$$

실험에 의해 구한 濾過抵抗 補正係數式 (13)식과 무차원시간에 따른 비퇴적량의 관계식인 식 (15)를 식 (10)에 대입하므로써 최종적으로 다음과 같은 曝氣 生物膜 여과반응조의 全濾過抵抗을 도출할 수 있었다.

$$\frac{h}{h_0} = \int_0^L a \cdot \exp(-b \cdot \sigma_B) \left[\frac{1 - \epsilon_0 + \sigma_B}{1 - \epsilon_0} \right]^2 \left[\frac{\epsilon_0}{\epsilon_0 - \sigma_B} \right]^3 \frac{dz}{L} \quad (16)$$

여기서 $a = 0.58$, $b = 4.50$

이 식 (16)의 실제 적용여부를 밝히기 위하여 실측한 濾過抵抗값과 이때 실험의 초기조건을 식 (16)

에 대입하여 계산된 이론치를 표 2와 표 3에 정리 하였으며 이를 도시해 보면 그림 6, 그림 7과 같다.

그 결과 그림으로 부터 알 수 있듯이 실험치와 이론치가 잘 일치함을 나타내었다.

다라서 이러한 결과를 미루어 볼때 본 연구에서는 제안한 曝氣 生物膜 濾過反應槽의 여과저항식이 반응조 설계시 실제 적용가능함이 실험적으로 입증되었다.

5. 結 論

曝氣 生物膜 濾過反應槽의 동력학 해석을 통하여 濾過抵抗 理論을 究명한 결과 미생물막의 증식에 따른 여층내의 폐색으로 인하여 발생하는 濾過抵抗을 砂濾過池의 여과저항 이론을 기초로 다음과 같은 曝氣生物膜 濾過抵抗 理論式을 제안하였다.

$$h = \frac{h_0}{L} = \int_0^L 0.58 \exp(-4.5 \cdot \sigma_B) \left[\frac{1 - \epsilon_0 + (\sigma_B)}{1 - \epsilon_0} \right]^2 \left[\frac{\epsilon_0}{\epsilon_0 - (\sigma_B)} \right]^3 dz$$

여기서 $\sigma_B = 0.130 + 0.001 \theta$ 이다.

參 考 文 獻

1. Miller, C.N., "An Approximate Formula Calculating the Discharging Capacity of Rapid Sand Filter Wash Water Through", In Water Purification ed. by Ellms, J.W.(1940)
2. Fair, G.M. and Geyer, J.C., "Water Supply and Waste Water Disposal", John Wiley and Sons. Inc. (1956)

3. Hulbert, R. and Feben, D., "Hydraulics of. Rapid Filter Sand", *Jour. AWWA*, Vol. 25, No. 1 (1933)
4. Fair, G.M. and Hatch, L.P., "Fundamental Factors Governing the Stream Line Flow of Water Through Sand", *Jour. AWWA*, Vol. 25, No. 1(1933)
5. Hatch, L.P., "Flow Through Gram-nular Media", *Applied Mechanics*, Vol. 7, No. 3 (1940).
6. Rose, H. E., "An Investigation into the Laws of Flow of Fluids Through Beds of Granular Materials", *Proc. Inst. Mech. Engr.*, Vol. 153 (1945)
7. 白井隆, "流動層", 科學技術 (1965)
8. 姜龍太, "急速濾過池의 濾過速度와 濾材構成의 研究-濾過抵抗을 중심으로", 大韓土木學會論文集, 제 3권, 제 3호, pp. 1-7 (1983)
9. 玄吉秀, "生物膜 濾過工法에 의한 水處理特性에 관한 研究", 東亞大學校, 學位論文 (1991)
10. 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)
11. 姜龍太, "急速濾過池의 濾過速度와 濾材構成의 研究", 東京大學 學位論文 (1982)
12. 姜龍太, 玄吉秀, 柳在益, "生物膜 濾過裝置의 最適 設計 및 逆洗에 關한 實驗的 研究", 韓國上下水道學會誌, 第2卷, 第1號, pp. 33-39(1989)
13. 柳在益, "FCS시스템에 의한 下水處理特性에 關한 研究", 東亞大學校, 學位論文 (1990)
14. APHA, AWWA, and WPCF, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 17th ed., Washington, D.C., USA (1987)
15. 日本下水道協會, "日本下水試驗方法", (1985)
16. 藤田賢二, 他, "曝氣濾過池によるアンモニア態窒素의 硝化", 水道協會雜誌, Vol. 56, No. 635, pp. 2-15 (1987)
17. 原田正光, 他, "ハニウム式生物處理における槽内汚泥收支", 水道協會雜誌, Vol. 58, No. 7, pp. 17-24 (1989)

(接受 : 1992. 2. 19)