

열전달 모델을 이용한 폐수처리공정의 온도 예측

노승백^{1*}

¹계명대학교 화학공학과

Temperature Prediction for the Wastewater Treatment Process using Heat Transfer Model

Seung-Baik Rho^{1*}

¹Department of Chemical Engineering, Keimyung University

요약 본 논문은 생물학적 활성오니 폐수처리공정의 열전달 모델식을 제시하여 공정의 온도를 예측하였다. 열전달 모델은 폐수처리공정에 들어오고 나가는 모든 열을 고려하였다. 공정에 들어오는 열은 태양 복사열과 포기조 impeller의 기계적 에너지의 변환열, 포기조 내의 생화학 반응열이다. 공정에서 나가는 열은 폐수 자체의 복사열, 포기작용에 의한 증발열과 포기조 표면으로 나가는 전도열, 바람에 의한 대류열, 포기조와 지표면과의 전도열을 고려하였다. 들어오고 나가는 모든 열은 기존의 열전달 경험식을 적용하였다. 적용된 경험식으로 폐수처리장 공정의 열전달 모델식을 제시하였다. 모델식으로 실제 폐수처리공정의 온도를 예측하였으며, 모델식 예측치와 실제값이 1.0℃ 이내로 일치하였다.

Abstract The temperature change in the biologically activated sludge wastewater treatment process was predicted using the heat transfer model. All incoming and outgoing heats in wastewater treatment processes were considered. Incoming heats included the solar radiation heat, the heat from impeller mechanical energy, and the biochemical heat in the aeration process. Outgoing heats comprised the radiation heat from the waste itself, the heat of vaporization and surface aeration, the wind convection heat and the conduction heat between the surface and aerator. All heats were used as an input to the existing empirical heat transfer model. The heat transfer model of wastewater treatment processes is presented also. To test the validity of the heat transfer model, the operating conditions of the actual wastewater treatment plant were used. The temperatures were compared with the model temperatures. Model predictions were consistent within the 1.0℃.

Key Words : Heat transfer, Temperature prediction model, Wastewater treatment process

Nomenclature

A : 포기조의 표면적[m²]

A_w : 유효벽면 및 바닥 넓이[m²]

C_C : 구름이 하늘을 덮는 양[-]

C_p : 물의 열용량[cal/kg℃]

F : 포기조의 수직 교차부분 면적[m²]

H_a : 포기조 표면 공기에 의한 대류열[cal/day] H_B : 포기조 내의 생화학 반응열[cal/day]

H_c : 포기조 표면에서 전도열[cal/day]

H_e : 포기조 표면에서 증발열[cal/day]

H_M : 포기조 임펠러 에너지의 변환열[cal/day]

H_r : 포기조 표면에서 물의 복사열 [cal/day]

H_S : 포기조 표면에서 태양 복사열[cal/day]

H_w : 포기조 벽과 바닥으로의 전도열[cal/day]

N : 포기조 수[-]

P : 포기조 동력[HP]

Q : 유량[m³/day]

S_r : 유기물 제거량[kgCOD removed/day]

T_a : 대기 온도[℃]

T_i : 폐수 유입 온도[℃]

T_w : 완전 혼합된 포기조의 폐수 유출 온도[℃]

U : 열전달계수[cal / m² day °C]

β : 대기 복사 인자[0.87]

ρ : 물의 밀도[kg/m³]

$\sum H$: 포기조의 흡수와 방출된 총열량[cal/day]

σ : 슈테판 상수[11.7x10⁻⁸ cal / cm² day K⁻⁴]

본 논문은 계명대학교 비사연구년 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Seung-Baik Rho(Keimyung Univ.)

Tel: +82-10-9750-5237 email: rhosb@kmu.ac.kr

Received January 27, 2014

Revised (1st February 20, 2014, 2nd March 3, 2014)

Accepted March 6, 2014

1. 서론

폐수처리공정 중에서 포기조(Aeration Basin)를 이용한 생물학적 처리는 가장 일반적인 방법이다. 이 방법은 여러 종류의 오폐수를 처리할 수 있고, 효율이 우수하며, 처리비용이 낮기 때문이다. 그러나, 생물학적 처리공정은 폐수에 있는 유기물과 무기오염물질을 산화시키는 미생물에 강하게 의존하며, 미생물은 폐수의 온도에 따른 영향을 받고, 미생물의 활성도가 온도에 따라 달라지기 때문에 공정의 효율은 포기조의 온도에 따라 달라진다. 따라서 포기조의 온도예측은 생물학적 폐수처리공정의 설계와 운전에 중요한 역할을 한다[1,2].

포기조 온도예측에 대한 기존 연구들을 살펴보면, 포기조의 평형온도 예측은 포기조를 냉각 연못(cooling pond)으로 가정한 정상상태 모델을 기초로 하여 연구를 시작하였다[3,4]. 그 후, 냉각 연못에 기계적 에너지와 생화학적 반응열을 포함하여 계산하는 연구를 하였으며[5], 폐수처리장의 위치에 따른 정보를 입력하여 계산하는 모델도 개발하였다[6]. 또한 폐수처리장의 온도에 영향 현상을 크게 8가지로 나누어 하루 동안 변화하는 온도 범위를 주고 그것으로 예측하는 연구도 있다[7]. 최근에는 폐수처리장 유출수의 열을 회수하기 위해 하수 관로 내의 폐수온도를 예측하는 연구도 있었다[8].

지금까지의 연구에서는 폐수처리공정 포기조의 온도에 영향을 주는 모든 열전달 인자들을 고려하지 못했다. 또한, 아직까지 폐수처리공정 설계에 폐수온도예측 열전달모델을 적용하지 않았다.

본 연구에서는 포기조 전체에 출입하는 모든 열을 고려하여 열전달 모델을 제시하였으며, 이를 대표적인 활성슬러지 시스템인 표면 포기조 온도 예측에 적용하였다. 개발된 열전달 모델을 실제 대구 지방의 기상데이터와 대구에 위치한 폐수처리공정의 운전조건을 열전달 모델에 적용하여 예측된 온도와 측정된 온도를 확인하였다.

2. 실험

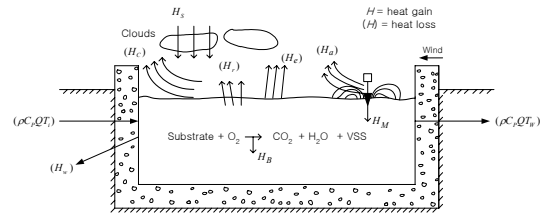
2.1 열전달 모델

포기조의 온도를 예측하기 위하여 포기조에 대한 에너지 보존 방정식을 적용하여 열전달 식을 세울 수 있다.

Fig. 1 은 정상상태에서 완전 혼합된 포기조의 가능한 유입되는 폐수와 유출되는 폐수의 온도, 밀도, 열용량, 유량 그리고 모든 열출입 인자($\sum H$)들로 표현한 것이다. 열출입 인자들은 폐수의 온도에 영향을 준다. 열수지식은

식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho C_p Q(T_w - T_i) = \sum H \quad (1)$$



[Fig. 1] Heat balance around the aeration basin

Fig. 1에 나타난 포기조의 열전달 요인은 흡수된 열과 방출된 열로 구별할 수 있다. 포기조로 들어오는 열은 태양 복사열(H_s)과 포기조 impeller의 기계적 에너지의 변환열(H_m), 포기조 내의 생화학 반응열(H_b)이 있다. 또한, 포기조에서 나가는 열은 포기조 표면에서 복사열(H_r), 증발열(H_e), 전도열(H_c), 포기조 표면 바람에 의한 대류열(H_a)과 포기조 벽과 바닥으로 손실된 전도열(H_w)이 있다. 포기조로 들어오는 열을 +로, 포기조를 나가는 열을 -로 표시하면 다음과 같다.

$$\sum H = H_s + H_m + H_b - H_r - H_e - H_c - H_a - H_w \quad (2)$$

그리고 식 (1)을 T_w 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$T_w = T_i + \frac{\sum H}{\rho C_p Q} \quad (2)$$

식 (2)는 포기조에서 물이 얻은 총열량과 온도를 나타낸 식으로 폐수의 유입 유출에 의한 온도변화와 $\sum H$ 로 표시되는 여러 가지 열전달 요인으로 표현된다. 따라서 포기조의 유입온도와 구성 형태, 기상상태가 결정되면 미지수는 유출온도만 남게 되고 이를 계산할 수 있다.

2.2 열전달 요인

포기조 표면에 복사된 태양 복사열(H_s)은 계절과 위도에 따라 달라지며, 하늘을 덮는 구름의 양에 따라 달라진다[3,4].

$$H_s = H_{SO} (1.0 - 0.0071 C_C^2) A \quad (4)$$

여기서, H_{SO} 는 태양 복사열($cal / m^2 day \text{ } ^\circ C$), C_C 는 구름이 하늘을 덮는 양으로 표현된 값이며, A 는 포기조의 표면적(m^2), H_{SO} 값은 계절과 위도에 따른 문헌에 제시된 값을 사용하였다[6].

표면 포기에 있어서 기계적 에너지(H_M)는 직접 폐수에 전달된다고 가정한다. 따라서, 포기조의 실제 축열을 기계적 에너지로 사용하며, 표면 포기에 들어간 에너지는 모두 물에 흡수되어 모두 열로 변환된다고 가정할 수 있다.

$$H_M = 15.2 \times 10^6 P \quad (5)$$

여기서, P 는 포기 동력(HP), 15.2×10^6 는 HP 를 cal/day 로 바꾸기 위한 전환상수이다.

폐수의 복사열(H_r)은 대기에서 포기조로 흡수된 복사열과 Stefan-Boltzman 복사에 의해 폐수에서 복사된 열의 차이와 같다. 다음과 같이 주어진다.

$$H_r = 0.97 A \sigma [\beta (T_a + 273)^4 - (T_w + 273)^4] \quad (6)$$

여기서, A 는 포기조의 표면적(m^2), σ 는 Stefan-Boltzmann 상수이다. 대기 복사 인자 β 값은 Raphael(1962)가 제안한 0.76~0.95 값인 0.87을 적용하였다[3].

물 표면으로부터 증발열(H_e)은 Novotny와 Krenkel (1973)식을 이용하였다. 이 식을 사용하고 증기 전달계수를 표현식으로 대치하면, 증발에 의한 열손실 식은 다음과 같다[5].

$$H_e = [1.145 \times 10^6 \times (1 - \frac{f_a}{100}) + 6.86 \times 10^4 \times (T_w - T_a)] \times e^{0.0604 T_a} V_w A^{0.96} \quad (7)$$

여기서, f_a 는 상대습도(%), V_w 는 풍속(m/sec)이다.

물 표면에서 공기로 전도(conduction)되는 전도열(H_c)은 열전달과 증기 전달계수로 계산하였다. 전도에 의한 열손실 식은 다음과 같다[5].

$$H_c = 11.8 \times 10^4 (T_w - T_a) V_w A^{0.95} \quad (8)$$

표면 포기에 의한 포기열(H_a)은 산소공급 분사기의 물방울로부터의 증발과 전도에 기인한다. 이 열손실의 추정치는 표면 증발과 전도식을 사용하였다. 이 방법에서 공기는 수증기로 포화되어 있고, 분사된 물방울과 접촉한 후 물과 열평형에 도달한다고 가정했다. 산소공급(포기)에 의한 열손실 가정으로 얻은 식은 다음과 같다[5].

$$H_a = 4.32 \times 10^4 NFV_w [300(T_w - T_a) + 2,920 e^{0.0604 T_a} (1 - \frac{f_a}{100}) + 175 e^{0.0604 T_a} (T_w - T_a)] \quad (9)$$

여기서, N 은 산소공급장치의 수, F 는 산소공급 분사기의 수직 교차부분 면적(m^2)이다.

포기조 벽면과 바닥을 통과하는 전도열(H_w)은 포기조의 건축자재 종류, 두께, 그리고 내부와 외부표면 사이의 온도 차이에 의해 영향을 받는다. 포기조 내부의 온도는 폐수의 유출온도(T_w)로, 외부의 온도는 대기온도(T_a)로 가정하였다. 전도열은 유효벽면 및 바닥 넓이와 총괄 전열계수와 포기조 내부와 외부의 온도차이로 계산할 수 있다. 벽으로부터 열손실 식은 다음과 같다.

$$H_w = A_w U (T_w - T_a) \quad (10)$$

여기서, A_w 는 유효벽면 및 바닥 넓이(m^2), U 는 열전달계수($cal / m^2 day \text{ } ^\circ C$)이다. 포기조의 열전달계수는 $1.0 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^4$ 범위의 값을 적용하였다.

2.3 포기조의 반응열

포기조의 생화학 반응은 발열반응이다. 따라서 폐수처리공정에는 생화학 반응열(H_p)이 발생한다. 유기 폐기물의 생분해로부터 방출되는 에너지는 유입 폐수의 성상, 포기조 미생물의 특성 및 농도 그리고 처리공법과 운전 조작 매개변수에 따라 달라진다.

포기조의 유출수 온도는 유입 폐수의 성상에 의해 큰 영향을 받는다. 폐수의 생화학반응은 탄소산화반응, 질산화반응, 탈질반응과 인제거반응이 있다. 인제거반응은 질산화와 탈질의 경우와는 다르게 온도에 대한 영향이 직접적인 영향이 아니라 간접적인 영향을 받는다는 연구결과가 있다[9]. 따라서 본 연구에서는 인제거반응에 의한 온도변화를 최소화하였다.

몇몇 연구자들은 질산화와 탈질반응에 의한 온도영향을 포기조 내로 들어오는 수용성 생분해 유기질소 양과

깁스에너지(Gibbs Energy)로 계산하였다[7].

또한 포기조의 온도는 운전조작 매개변수에 의해 영향을 받는다. 몇몇 연구자들의 연구에 의하면 부유식 영양소 제거공정과 부착식 영양소 제거공정 그리고 부유식과 부착식을 결합한 영양소 제거공정의 온도 영향에 대한 결과를 발표하였다[10]. 본 연구에서는 질산화와 탈질 반응에 대한 온도 영향을 고려하지 못하였고, 운전은 부유식 영양소 제거공정만을 가정하여 유출수 온도를 예측하였다.

영양소 제거공정의 생화학 반응열은 다음과 같이 가정하였다. 유기물의 산화 자유에너지는 -3300 cal/gCOD oxidized 이다. 기질이 피루빈 물질(Pyruvate)화 하는 자유에너지는 -100 cal/gCOD 이다. 피루빈 물질이 세포 물질화 하는 자유에너지는 +930 cal/gCOD 이다. 순수한 세포 물질 산출량은 0.25 gVSS/gCOD removed 이다. 세포 물질의 COD는 1.42 gCOD/gVSS 이다. 이러한 값들을 사용하여 유기물의 생분해로부터 방출되는 순수에너지는 전체 열계산에 다음과 같이 기여한다[1].

$$H_B = 1.8 \times 10^6 S_r \quad (11)$$

여기서, S_r 는 유기물 제거량이다. 생화학 반응열은 세포 물질에 매우 민감하며, 제거율이 빠른 시스템(짧은 슬러지 수명)에서는 제거된 COD당 더 많은 VSS(Volatile Suspended Solids)를 만들어 내며 열로 방출된 에너지의 양을 감소시킨다. 반면, 제거율이 느린 시스템(긴 슬러지 수명)에서는 적은 VSS가 발생하며, 결과적으로 더 많은 사용 가능한 에너지를 열로 바꾼다. 가정된 자유에너지값에서 실제 에너지 방출량은 370 cal/gCOD 에서 3300 cal/gCOD이다.

포기조의 유출수 온도를 결정하기 위해서 식(4)에서부터 식(11)을 식(3)에 대입하면 아래와 같은 폐수처리공정의 온도 예측을 위한 열전달 모델식을 얻을 수 있다.

$$T_w = T_i + \frac{(H + H_M + H_B - H_r - H_c - H_e - H_a - H_w)}{\rho C_p Q} \quad (12)$$

포기조로 들어오고 나가는 모든 열전달 요인을 포함하여 계산하면 완전 혼합된 포기조의 유출수 온도를 예측할 수 있다.

2.4 실험 데이터

열전달 모델을 적용하기 위하여 기상청의 기상연보를 활용하였다[11]. 기상연보의 월간요약자료(Monthly

Meteorological Summary)중에서 기온, 상대습도, 평균운량, 평균풍속을 이용하였다. Table 1은 대구지역의 2006년 기상연보의 월간요약자료이다.

[Table 1] Meteorological Data of Taegu, Korea

Month	Air temp (°C)	Relative humidity (%)	Cloud cover	Wind speed (m/s)
Jan	1.6	53	2.2	3
Feb	3.4	49	2.9	3.2
Mar	8.2	54	5.8	2.5
Apr	14.9	58	4.6	3.1
May	19.5	56	3.5	2.9
Jun	23.5	66	5.7	2.6
Jul	24.6	74	7.7	3
Aug	25.5	76	7.2	2.7
Sep	23.3	76	6.3	2.3
Oct	15.2	69	4.8	1.9
Nov	9.2	60	3.4	2.1
Dec	2.8	54	2.1	2.6

대구지역에 위치한 폐수 종말처리장은 설계 용량 80,000 m³/day 이며, 표면 포기조를 이용하는 설비를 갖추고 있다. Table 2는 위 처리장의 2006년 월간 평균 운전값이다.

[Table 2] Operational Data for the Taegu Sung-Seo Wastewater Treatment Plant

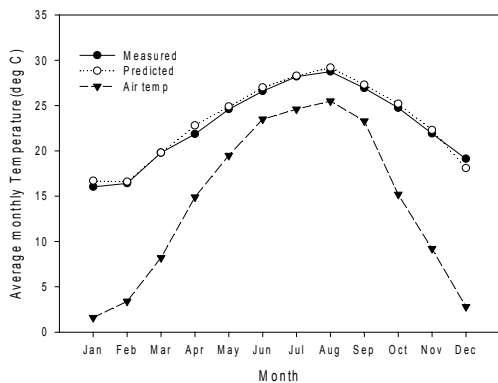
Month	Flow rate (m ³ /day)	Org. remove (kg/day)	Aeration power (kW)	Inlet temp. (°C)
Jan	48,450	27,700	1,640	16.5
Feb	45,740	18,600	1,680	16.9
Mar	54,900	19,500	1,760	19.5
Apr	56,500	20,100	1,740	21.6
May	57,620	21,100	1,900	24.1
Jun	59,680	21,100	1,960	25.5
Jul	58,890	31,800	1,920	27.2
Aug	58,730	30,400	1,980	27.7
Sep	66,450	38,100	2,100	25.8
Oct	63,100	36,400	2,000	24.0
Nov	59,730	27,900	1,960	21.6
Dec	58,880	12,700	1,760	19.5

3. 결과 및 고찰

제시된 열전달 모델의 적합성을 확인하기 위해서, 폐수처리공정의 유출수 온도와 열전달 모델로 예측한 온도를 비교하였다. 폐수처리장의 유입폐수는 수중 포기가 설치된 유량조정조(Equalization Basin)를 거쳐 연속 2

계열로 이루어진 최초침전지(Primary Sedimentation Basin)에서 생슬러지가 제거되며, 원수는 표면 포기기(Aeration Basin)가 설치된 활성슬러지조(Activated Sludge Basin)에서 BOD, COD 성분을 제거하는 생화학적 분해반응이 일어나고, 반응된 원수는 2차 침전지로 이송되어 반송 및 잉여 슬러지로 분리된다. 반송슬러지는 표면 포기조의 적정 MLSS(Mixed Liquor Suspended Solid)를 유지하기 위하여 이송되며, 표면 포기조의 F/M 비(Food-to-Microorganism ratio)는 반송량에 의해 맞추어진다. 2차 침전지를 거친 원수는 활성화된 슬러지의 COD, BOD, SS 성분을 흡착에 의해 제거하기 위하여 사여과지(Sand Filtration)공정을 거치며, 여과된 물은 방류된다.

폐수처리공정의 표면 포기조와 공기가 접촉하는 표면적은 5,600 m², 포기조 옆과 밑바닥 면적은 총 7,400 m²이다. 포기는 각각 55 HP로 작동되는 16개의 가변 속도 포기기에 의해 제공된다. 하나의 포기조의 스프레이 면적은 78.5 m²이다. 포기조 벽면의 열전달 계수는 2.0X10⁴ cal / m² day °C 로 가정하였다. 기상조건과 운전조건, 생화학분해반응 조건, 포기조와 포기기 자료를 입력하여 월간 폐수처리공정의 유출수 온도를 계산하였다. 계산 결과는 Fig. 2에 그래프로 표시하였다.



[Fig. 2] Comparison between predicted and measured temperature and the ambient air temperature

Fig. 2에서 보면 폐수처리공정의 유출수 온도와 열전달 모델로 예측한 온도는 1.0°C 이내에서 잘 일치함을 보여주고 있다. 포기조의 정확한 온도 예측의 중요하다. 포기조 온도가 폐수 내에 있는 BOD, COD 성분을 제거하는 생화학적 분해반응의 속도상수(k)에 큰 영향을 미치기 때문이다. k 를 크게 해서 나타나는 오차는 포기조를 적게 설계할 것이고, k 를 작게하면 포기기를 너무 크게 설계하게 된다. 속도상수 k 는 다음과 같이 온도에 관계되

어 있다.

$$k = k_o \Theta^{\Delta T} \tag{13}$$

여기서, k는 설계 온도에서 제거 상수(liter/mg day), k_o는 참조 온도에서 제거 상수(liter/mg day), θ는 온도계수, ΔT는 설계온도와 실제온도 차이(°C)이다. 그러므로, 포기조의 설계 용량에 중요한, k 는 온도계수 (Θ)와 온도차 (ΔT)에 따라 달라진다.

4. 결론

본 논문에서 제시한 폐수처리공정의 열전달 모델은 광범위한 기후 조건과 조업 조건에서 포기조 온도를 정확하게 추정하기 위한 방안이 될 수 있다.

열전달 모델은 폐수처리공정 주변에서 발생하는 모든 열전달, 즉 전도, 대류, 복사에 의한 열전달을 고려하고 포기기에서 발생하는 기계적인 열과 포기기 내의 활성슬러지에 의한 생화학 반응열을 고려하여 열전달 모델을 만들었으므로 기후 조건과 운전 조건으로도 예측된 값은 월별 실측값과 1.0°C 이내의 온도 범위에서 잘 일치하였다. 따라서 열전달 모델에 사용되는 매개 변수들은 모델을 범용적으로 이용하기에 적절한 값을 갖고 있다.

본 연구에서는 질산화와 탈질 반응에 대한 온도 영향을 고려하지 못하였고, 운전은 부유식 영양소 제거공정, 즉 표면 포기조의 생화학적 반응열만을 가정하여 유출수 온도를 예측하였다. 앞으로의 연구에서 질산화와 탈질 반응에 대한 온도 영향과 고도처리를 위한 호기조, 혐기조, 무산소조, 탈기조에서의 반응열을 고려하여 열전달 모델에 적용하면 고도처리 폐수처리장의 포기조 온도를 예측할 수 있을 것이다.

References

- [1] Argaman, Y.; Adams Jr., CE., "Comprehensive Temperature Model for Aerated Biological Systems", Prog. Water Technol., 9, 397-409, 1977.
- [2] Wells, S. A., "Effect of Winter Heat Loss on Treatment Plant Efficiency", J. Water Pollut. Cont. Fed., 62(1), 34-39, 1990.
- [3] Raphael, J. W. "Prediction of temperature in rivers and reservoirs", J. Power Div., ASCE 88, 157-166, 1962.

- [4] Thackston, E. L. and Parker, F. L., "Geographical Influence upon Cooling Pond", J. Water Pollution Cont. Fed., 44, 7-12, 1972.
- [5] Novotny, V. and Krenkel, P. A., "Evaporation and Heat Balance in Aerated Basins", AIChE Symposium Series, 70(136), 150-159, 1973.
- [6] Talati, S. N. and Stenstrom, M. K., "Aeration Basin Heat Loss", J. Environ. Eng. ASCE, 116 (1), 70-86, 1990.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1990\)116:1\(70\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1990)116:1(70))
- [7] la Cour Jansen, J., Kristensen, G. H. and Laursen, K. D., "Activated Sludge Nitrification in Temperature Climate", Water Sei. Technol, 25(4-5), 177-184, 1992.
- [8] Dürrenmatt, D. J. and Wanner, O., "A mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers", Water Research, 48(1), 548-558, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.017>
- [9] Choi, Y. S. and Yoo, D. W., "Temperature Effects on Nutrient Removal Process", Korean Soc. of Water Quality, 1997(1), B-1, 1997
- [10] Kang, Y. H., "Temperature effect on the performnce of biological nutrients removal system combining attached at suspended growth", MS Thesis, Korea Univ., 2004.
- [11] The Korea Meteorological Administration, South Korea, Monthly Meteorological Summary, http://www.kma.go.kr/weather/climate/data_monthly.jsp, (accessed Dec., 10, 2013)

노 승 백(Seung-Baik Rho)

[정회원]



- 1980년 2월 : 서강대학교 화학공학(공학사)
- 1982년 2월 : KAIST 화학공학(공학석사)
- 1990년 2월 : KAIST 화학공학(공학박사)
- 1989년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 화학공학과 교수

<관심분야>

수처리모델링, 유탄유 수명예측, 이온교환수지