

# Solar Energy를 이용한 하수처리의 질소 제거에 관한 연구

황 용 하\*<sup>1)</sup>

충주대학교 에너지시스템공학과<sup>1)</sup>

## A Study on Removal of Nitrogen at Sewage Treatment using Solar Energy

Yong Ha Hwang\*<sup>1)</sup>

1)Department of Energy System Engineering, Chungju National University, 50 Daehak-ro, Chungju, Chungbuk 380-702, Korea

(2011.09.14 Received / 2011.10.21 Accepted)

**Abstract** : The purpose of this research is to improve nitrogen removal efficiency in winter season through rise of water temperature of extraneous water by using solar energy which is estimated to have great potential among new regeneration energy and while operating Plug-Flow Reactor to improve nitrogen removal efficiency by selecting A/O process among sewage - waste water treatment processes as the necessity of solving the problem of nitrogen removal efficiency according to reduced water temperature in winter season and strengthening of water quality criteria regarding discharged sewage - waste water suggested in the research background.

Summarizing the research result, supply of solar energy source improves the function outstandingly when removing nitrogen, (nitrogen removal rate before operating solar energy 55.4% → nitrogen removal rate after operating solar energy 84.1%).

**Key Words** : Solar Energy(태양열 에너지), Sewage Treatment(하수처리), Removal Efficiency(제거효율)

### 1. 서론

도시와 산업의 급속한 발달은 하·폐수의 발생량을 증가시키고 있으며 이들 물질들은 미처리된 질소와 인 등의 방류로 인하여 부영양화 및 수질오염 발생된다.

이러한 하·폐수의 오염물질 처리를 위한 현 국내 시설의 경우, 대부분 표준 활성슬러지 공법을 채택하나 동절기 시 낮은 수온으로 인한 질소 제거에 어려움이 야기된다. 따라서 이러한 질소 처리 효율이 저하되는 문제를 해결해야 할 문제이다.

본 연구의 목적은 하·폐수의 방류수 수질기준 강화 및 동절기 수온 저하에 따른 질소제거 효율 저

하 문제 해결의 필요성이 제기됨에 따라 하·폐수 처리 공정 중 질소 처리 효율 향상을 위해 태양열 에너지<sup>[1]</sup>를 이용하여 유입수의 수온 상승효과를 통해 동절기 질소 제거 효율을 향상시키는데 있다.

태양열 에너지시스템을 병행 설치하는 것으로써 전체 설비의 하수처리 능력이 향상되는 것은 아니기 때문에 적절한 온도대의 태양열 에너지를 안정적으로 공급하기 위한 제어기술과 연구가 필요하다고 할 수 있다.

### 2. 본론

#### 2.1 문헌적 고찰

##### 2.1.1. 태양열 에너지 연구 동향

본 연구에서 태양열 에너지의 최적 이용을 위하

\* Corresponding author. E-mail : yhhwang@cjnu.ac.kr.

여 해당 지역에 대한 최적 일사자료가 요구되고, 일사자료에 관한 연구는 일사량자원의 평가에 관한 연구와 일사량의 성분분석에 관한 연구로 나누어 볼 수 있다.

- 1) 일사량 자원의 평가에 관한 연구
- 2) 일사량 성분 분석에 관한 연구
- 3) 태양열 집열 및 집광시스템에 관한 연구
- 4) 축열조에 관한 연구
- 5) 태양열 이용 냉난방 시스템과 태양열 온수기에 관한 연구

**2.1.2. 생물학적 질소 제거 연구 동향**

최근 보고 되고 있는 토양 및 수계 내 질소제거를 위한 새로운 생물학적 질소 제거 연구 동향은 다음과 같다.

- 1) 동시 질산화 탈질
- 2) 혐기적 ammonium 산화 반응
- 3) NOx 공정

**2.2. 이론적 고찰**

**2.2.1. 태양에너지 이용기술 원리**

태양에너지의 이용은 광과 열의 이용이다. 광을 이용한 태양광발전은 변환효율이 낮은 단점이 있기 때문에 고효율을 얻을 수 있는 기술개발이 지속적으로 요구되며 태양열 에너지는 집열과 축열 기술이 가장 기본이 되는 기술이다.

**2.2.2. 생물학적 질소 제거 원리**

생물학적 질소제거는 두 가지 단계로 이루어지며 첫 단계(질산화)에서 암모니아가 질산성질소로 산화되고 두 번째 단계(탈질화)에서 중속영양미생물(Heterotrophic bacteria)들에 의해 질산성질소가 전자수용체로 사용되어 환원되면서 질소가스로 변환된다.

**2.3. 실험 장치 및 방법**

**2.3.1. 태양열 에너지 장치**

시스템의 일정 열성능을 유지하며 초기투자비 측면에서 유리한 시스템 선정을 위하여 하수처리 장치 시공 전 다음과 같은 연구를 수행하였다.

- 1) 집열면 일사 조건을 통한 집열기 설치 위치 선정

Fig.1은 태양열 이용 생물학적 하수 처리장치가 설치되어질 지역 주변의 구획도를 나타내고 있다.

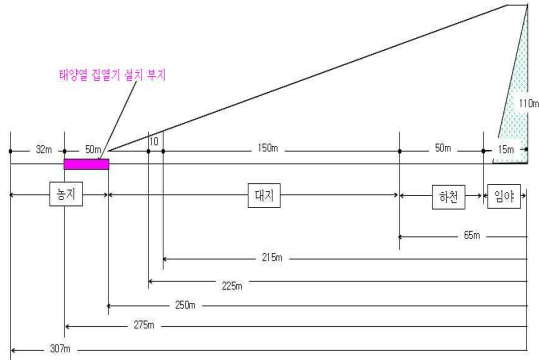


Fig.1 Layout drawings of solar collector

주변에 의한 집열면에 발생하는 음영 상태 평가는 태양고도가 가장 낮은 동지 때의 각각의 위치에서의 음영상태를 통하여 최적의 집열기 설치 위치를 산정하였다.

- 2) 태양열 적용 최적 집열기 선정 및 태양열 분담률 평가

Fig.2는 태양열 이용 생물학적 하수처리장치에 평판형 집열기를 적용 한 경우 하수유입온도가 상대적으로 낮은 동계에는 12%, 하수유입온도가 상대적으로 높은 하계의 경우 56%를 상회하고 있음을 확인할 수 있었다. 연중 태양열 분담률은 평균 23.4% 정도로 평가되었다.

Fig.4는 태양열 이용 생물학적 하수처리장치에 진공관 집열기를 적용한 경우 월별 하수부하, 폐열 열교환기 회수열, 태양열 집열기 유용에너지와 보조보일러 공급에너지량을 나타내었으며 연중 태양열 분담률은 평균 23.7% 정도로 평가되었다.

본 연구에서는 태양열 분담률 평가에 평판형 집열기 대비 진공관 집열기를 설치할 경우 초기 투자비 대비 열성능(평판형집열기: 23.4%, 진공관집열기: 23.7%) 평가 결과를 고려할 때 평판형 집열기의 설치 적용이 타당하다는 결과를 얻을 수 있었다.

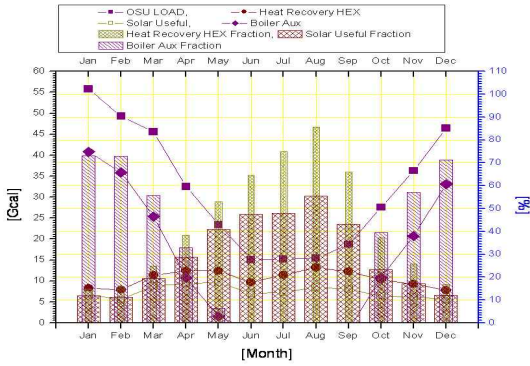


Fig. 2 Solar energy allotment rate in single flat form

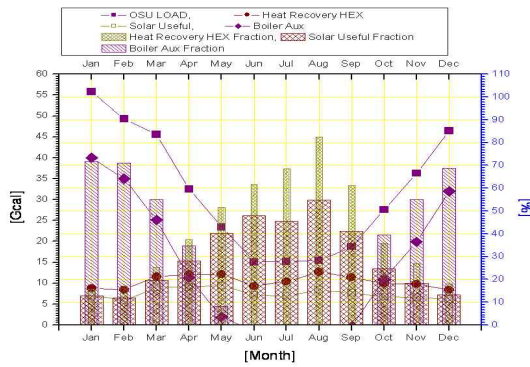


Fig. 3 Solar energy allotment rate in vacuum-tube form

3) 태양열 이용 생물학적 하수처리장치 설계 및 설치

① 집열부 판형열교환기(Compact Plate Heat Exchanger)

Fig. 4는 전열면적  $4.68\text{m}^2$ , 열용량비 0.91775에 대한 집열부 판형열교환기의 전열수에 대비 열교환기 유효도를 나타내고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 기존 설계치 전열면적  $4.68\text{m}^2$ 이 적게 산정되었음을 확인할 수 있었다. 즉 저온부 및 고온부 입구온도 대비 출구온도 증가를 위하여 설계치 전열면적의 증가가 필요함을 확인할 수 있었다.

② 보조보일러

태양열을 이용한 생물학적 하수처리장치의 보조보일러의 설계는 보일러 작동 설정온도  $25^\circ\text{C}$ 를 두어 보조 보일러의 정격 용량을 산정하였다. 본 연구에서는 분석결과만을 나타내었다.

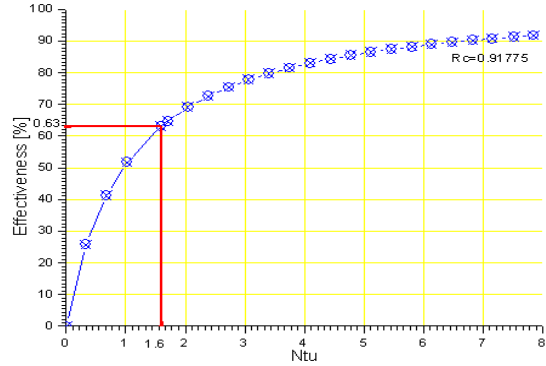


Fig. 4 Heat exchanging availability of heat collector

태양열을 이용한 시스템의 열성능 평가를 위하여 태양열 이용 생물학적 하수처리장치 측정 시스템을 설치하였다.

측정 시스템에서 센서(Transducer)는 저항온도계(RTD : 온도 측정), 유량계(질량유량계 : 유량측정), 일사량계(피라노미터)가 사용되었다. 센서의 종류, 설치위치 및 계측기의 채널위치는 Fig. 5와 같다. Fig. 6은 평판형 태양열 집열기를 보여준다.

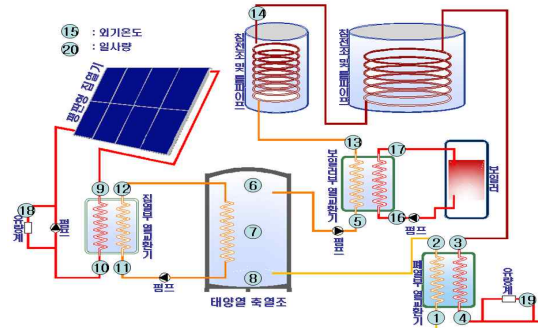


Fig. 5 Sensor type and installation location



Fig. 6 View of heat collector using solar energy

2.4. 실험 결과

2.4.1. Mode 별 조건 변화에 따른 질소 제거 효율 평가

1) Mode 별 조건 변화에 따른 질소 제거 효율 평가

mode 1의 경우 평균 4.54의 TCODCr/T-N비에서 평균 35.5%의 질소제거율을 갖는 것으로 나타났고, 낮은 유기물 농도에서도 유입수의 유기물 농도와 질소제거율이 비슷한 경향을 가지며 변화하는 것으로 나타났다.

Table 1 Removal efficiency of mode 1

Constituents	Influent (max~min)	Effluent (max~min)	Removal(%) (max~min)
T-N, mg/L	11.2 (13.5~9.5)	7.17 (8.52~6.3)	35.5 (45.6~26.3)

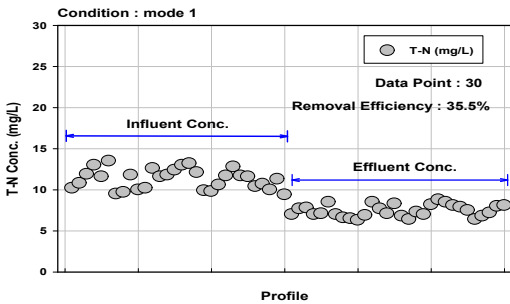


Fig 7. Profiles of T-N concentration for mode 1

mode 2 역시 유입수내 탄소원 부족으로 낮은 질소제거율을 나타냈지만, mode 1의 방류수 농도와 제거율이 8.52~6.3mg/L, 45.6~26.3%임을 감안할 때, mode 1보다는 다소 향상된 수치를 보였다. mode 2는 평균 4.79의 TCODCr/T-N비에서 평균 50.21%의 질소제거율을 갖는 것으로 나타났다.

Table 2 Removal efficiency of mode 2

Constituents	Influent (max~min)	Effluent (max~min)	Removal(%) (max~min)
T-N, mg/L	11.17 (15.22~8.6)	5.36 (5.8~4.9)	50.2 (64.0~36.3)

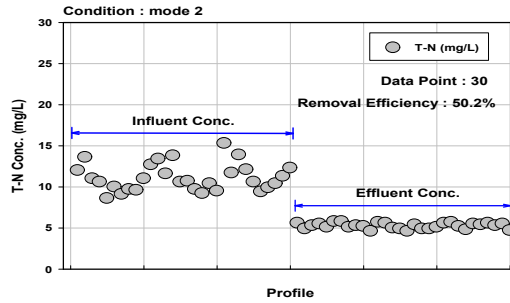


Fig 8. Profiles of T-N concentration for mode 2

mode 3은 유입수내 부족한 탄소원을 보충하기 위해 유입수와 함께 외부탄소원인 메탄올을 각 Plug-Flow Reactor에 5L/d씩 첨가하였다. 반응조 수리학적 체류시간(HRT)은 8시간으로 동일하게 운전하였지만, 슬러지 체류시간(SRT)은 외부탄소원 첨가로 인해 미생물양이 증가함에 따라 폐기량을 늘려 20~25day로 유지하였다.

T-N의 경우 유입수가 12mg/L~7.7mg/L이고, 방류수가 1.8~1mg/L로 90.5~83.3%의 제거율을 나타냈다.

Table 3 Removal efficiency of mode 3

Constituents	Influent (max~min)	Effluent (max~min)	Removal(%) (max~min)
T-N, mg/L	10.22 (12~7.7)	1.41 (1.8~1)	86.1 (90.5~83.3)

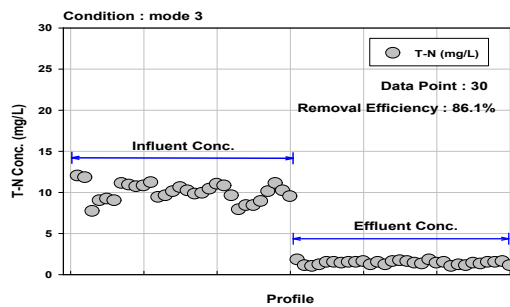


Fig 9. Profiles of T-N concentration for mode 3

2) Mode 별 조건 변화에 따른 질소 제거 특성  
질소 제거의 경우 T-N 방류수 농도가 mode 1, mode 2, mode 3 각각 평균 7.17, 5.36, 1.41mg/L로 나

타났으며, 제거율의 경우 35.5, 50.2, 86.1%로 나타났다.

**Table 4 Removal efficiency of mode 1, 2, 3**

Constituents	mode 1 Removal(%)	mode 2 Removal(%)	mode 3 Removal(%)
T-N	35.5	50.2	86.1

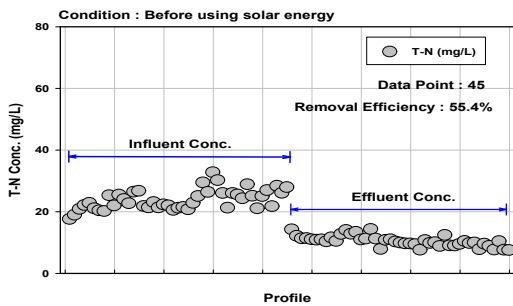
**2.4.2. 태양열 에너지 가동 전/후의 질소 제거 효율 평가**

태양열 에너지 가동 전 유입수의 성상은 평가 기간 동안 수온은 12°C~22.5°C의 범위로 유입되었으며 유입수 및 유출수의 질소 제거 처리 성능을 Table 5에 나타내었다.

T-N 처리효율 및 처리 효율 변화는 Fig 10에 나타내었다. 이는 동절기 수온 저하로 인하여 제거효율이 저하되는 것으로 사료되며, 이를 해결하기 위하여 운전 모드 변경 및 동절기 수온 상승방안이 필요한 것으로 판단되어진다.

**Table 5 Removal efficiency before using solar energy**

Constituents	Influent (max~min)	Effluent (max~min)	Removal(%) (max~min)
T-N, mg/L	23.8 (17.5~32.7)	10.4 (7.4~14.3)	55.4 (19.2~73.3)



**Fig. 10 Profiles of influent and effluent in the T-N**

태양열 가동 후 동절기 유입수의 성상은 평가 기간 동안 수온은 6°C~17°C의 범위로 유입되었다. 유입수 및 유출수의 질소 제거 처리 성능을 Table 6에 나타내었다.

질소의 경우, 유입수 내 원수의 T-N 농도는 19.79~33.26mg/L(평균 25.4mg/L)이며, 유출수의 T-N 농도는 2.62~7.14mg/L(평균 4.02mg/L)로 평균 제거율 84.1%를 보였으며 태양열 에너지를 가동하기 전에 비하여 평균 제거율이 28.7% 향상된 것을 알 수 있었다.

**Table 6 Removal efficiency after using solar energy**

Constituents	Influent (max~min)	Effluent (max~min)	Removal(%) (max~min)
T-N, mg/L	25.4 (19.79~33.26)	4.02 (2.62~7.14)	84.1

**2.4.3. 태양열 에너지 가동에 따른 경제성 분석**

정확한 경제성 분석을 위해서는 연평균 효율 47.6%를 전체적으로 고려하였으며 분석을 위해서는 여러 가정이 필요하며 다음의 Table 7, 8에 연간 유지비용을 나타냈다. 1년차 운영비에는 설치비용이 포함된 것이며, 기타 연도에는 연간 운영비와 보일러인 경우, 연료의 비용이 포함된 것이다.

**Table 7 Comparison of operating expenditure (1)**

연 차	태양열 설비		보일러 설비		
	연 간 운영비	누 적 운영비	연 간 운영비	등 유 비 용	누 적 운영비
1년차	99,960	99,960	2,040	7,602	9,642
2년차	1,960	101,920	40	7,982	17,663
3년차	1,960	103,880	40	8,381	26,084
4년차	1,960	105,840	40	8,800	34,924
5년차	1,960	107,800	40	9,240	44,204
6년차	1,960	109,760	40	9,702	53,946
7년차	1,960	111,720	40	10,187	64,173
8년차	1,960	113,680	40	10,696	74,909
9년차	1,960	115,640	40	11,231	86,180
10년차	1,960	117,600	40	11,793	98,013
11년차	1,960	119,560	40	12,382	110,435
12년차	1,960	121,520	40	13,001	123,477
13년차	1,960	123,480	40	13,651	137,168
14년차	1,960	125,440	40	14,334	151,542
15년차	1,960	127,400	40	15,051	166,633

Table 7 Comparison of operating expenditure (2)

항 목	태양열 설비	보일러 설비
집열기 면적(m <sup>2</sup> )	140 (70매)	-
설치비용(천원)	98,000 (700천원/m <sup>2</sup> )	2,000
시스템 효율(%)	47.6 (실측치)	85
경사면일사량 (kcal/day)	3,200 (실측치) (일일 집열 열량 : 213,248)	8,700 kcal/L (일일 필요 등유량 : 29L)
수 명(년)	15	15
연 이용 월수(월)	10 (7,8월 제외)	1 (7,8월 제외)
연간 운영비(%)	설치 비용의 2%	설치 비용의 2%

### 3 결론

본 연구에서는 동절기 하수처리 시설의 질소 제거 효율 향상을 위하여 태양열 에너지를 이용한 유입수 수온 상승효과에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 태양열원의 이용 동절기 질소 제거시 뛰어난 성능 향상을 가져 오는 것으로 태양열 가동전과 후의 질소제거율 55.4%에서 84.1%로 증가를 보여 이는 하·폐수 처리장에서 문제시 되고 있는 동절기 수온에 의한 처리 효율 저하를 방지할 수 있는 방안을 얻었다. 이를 근거로 새로운 대안이 될 것으로 보여 진다.

2) 집열기의 3월초에서부터 4월 말까지의 실측된 데이터를 근거로 태양열 축열 시스템의 열 성능을 평가를 통하여 평균 집열기 효율은 일 월별 상대적으로 차이를 보이지만 평균 52% 정도의 값을 유지하고 있음을 확인할 수 있었다.

3) 동절기 수온저하와 공정의 온도 저하로 인하여 하수처리장의 질소 제거율이 감소하는 것을 방지하기 위하여 태양열원을 이용한 유입수의 온도 증가로 동절기 공정 최적 운전 조건을 유지하는 조건하에서 질소 제거율 70%이상 유지할 수 있음을 나타낸다.

### Acknowledgement

이 논문은 2011년도 충주대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

### References

- [1] 신재생에너지센터, “2006년 신재생에너지통계”, 2007.
- [2] 환경부 “하수도법 시행규칙 일부개정령안”, 2009.
- [3] Lucija Foglar and Felicita Bris̃ki (2002) Wastewater denitrification process-the influence of methanol and kinetic analysis. Process Biochemistry, 39: 95-103.
- [4] R. Tamme, "Phase-Change Storage Systems" proc. Workshop on Thermal Storage for Trough Power Systems, Golden CO, USA, Feb., 2003.