

생태적 축산폐수 처리 및 재활용 연못시스템의 Pit 메탄발효

양 홍 모
전남대학교 농과대학 조경학과

Methane Fermentation of Pit in Pond System for Ecological Treatment and Recycling of Animal Excreta

Hong-Mo Yang (Dept. of Landscape Architecture, College of Agriculture, Chonnam National University, Kwangju, 500-757, Korea, Tel 062-530-2101)

ABSTRACT: An integrated wastewater treatment pond system is developed for treatment and recycling of excreta from dairy cattle. It is composed of three ponds in series. A pit with a capacity of 10 m³, 2-day hydraulic residence time, and overflow velocity of 1.5 m³m⁻²day⁻¹ is located internally in primary pond. It is designed for efficient sludge sedimentation and effective methane fermentation. It receives 5 m³/day of diluted cattle excreta by the water used for clearing stalls. A submerged gas collector for the recovery of methane is installed on the top of the pit.

The average BOD₅ concentration of influent is 398.7 mg/l. That of the effluent from primary pond is 49.2 mg/l. About 88 % of BOD₅ are removed in primary pond. It is assumed that about 60% of the influent BOD₅ is removed in the pit and that almost all of the carbon of the removed BOD₅ in the pit is converted to methane and carbon dioxide.

Methane fermentation of the pit is well established at 16°C. This phenomena results from temperature stability, complete anaerobic condition, and neutral pH of the pit. Gas from the collector is almost 90% methane, less than 9% nitrogen, and less than 1 % carbon dioxide. Thus a purified methane is produced, which can be used as energy source.

Key Words: wastewater treatment pond system, fermentation pit, facultative pond, hydraulic residence time, overflow velocity, submerged gas collector

서 론

하·폐수처리 연못시스템(Wastewater Treatment Pond System)은 자연상태에서 태양에너지와 생태계의 작용에 의해 각종 하·폐수를 처리하는 기법으로 생활하수, 공장폐수, 축산폐수를 처리하기 위해 열대에서 한대에 걸쳐 전세계적으로 도시나 농촌마을에서 이용되고 있다.

국내의 경우 연못시스템의 일부 과정을 수행하는 산화지(Oxidation Pond)가 기계식 처리 후 배출되는 공장폐수나 간이정화조 처리 후 유출되는 축산폐수를 처리하기 위해 이용되고있으며, 체계적인 연못시스템은 최근야야 활용이 시도되고 있다.

하·폐수에 함유되어 있는 유기물을 효율적으로 처리하기 위해 유기물을 메탄과 이산화탄소로 전환시키는 방법이 응용되어 왔다. 혐기성 슬러지 소화조(separate sludge digester) 설계에 이 방법이 활용되어 왔으며, 최근에는 연못시스템의 메탄발효 피트(pit) 설계에도 이 접근방법을 활

용하고 있다.

소화조의 슬러지는 적정온도의 혐기성상태에 이르면 가스가 발생하면서 처리된다. 따라서 소화조의 가스를 측정하여 소화조의 슬러지 제거 정도를 파악할 수 있으며, 대형 소화조의 경우 회수된 가스를 에너지원으로 사용할 수 있다. 소화조의 처리효율을 높이기 위해 가온, 재순환, 교반 과정이 첨가되면서 생산비용이 증가하는 추세이다. 미국의 경우 정교한 소화조의 생산비용이 \$1,000/m³에 달한다. 연못시스템의 연못바닥에 설치하는 메탄발효 Pit는 자연생태적으로 슬러지가 분해되고, 토공(earth work)으로 설치된 Pit는 설치비용이 \$10/m³로 경제적이며, 유입폐수의 체류시간 연장이 용이하여 슬러지를 제거하는데 유리하다.¹⁾

수심 1.5 - 2 m의 하·폐수처리 조건성연못(facultative pond)은 강한 바람이 불면 윗층의 용존산소가 바닥으로 침투하여 혐기성분해가 정지하고 연못바닥의 pH가 낮아지면서 H₂S의 냄새가 발생하는 경우가 있다.^{2) 3)} 바람에 의한 용존산소 바닥침투를 줄이기 위해 연못의 수심을 깊게 하면

혐기성상태를 유지하는데는 도움이 되나 연못바닥의 수온이 내려가는 결점이 있다. 용존산소의 연못바닥 침투를 차단하고 유입 하·폐수의 온도를 유지시키면서, 유기물을 적은 면적에 침전시키기 위해 연못바닥에 Pit를 설치하는 방법이 연구되고 있다.^{4) 5)}

본 연구는 축산폐수를 처리 및 재활용하기 위해 설계 시공한 실험 연못시스템의 1차연못 바닥에 설치한 메탄발효 Pit의 초기 메탄발효와 폐수처리 환경을 분석하여 우리나라 기후조건에 적합한 Pit 설계인자를 검토하는데 연구목적이 있다.

재료 및 방법

실험 연못시스템의 구조

하·폐수를 처리하는 연못의 종류는 혐기성 연못, 호기성 연못, 호기층과 혐기층이 공존하는 조건성 연못 (Facultative Pond), 혐기성 연못 등이 있다.^{6) 7)} 효율적인 하 폐수처리를 위해 온대권에서는 조건성, 호기성 연못을 적절히 연결시켜 병렬형(series), 직렬형(parallel), 혹은 병렬과 직렬 혼합형으로 연못시스템을 설계하고 있다.⁸⁾ 호기성 연못이 유기물 부하량이 증가하면 조건성 연못으로 변하고, 혐기성 연못이 유기물 부하량이 적어지면 조건성 연못으로 변하기 때문에, 조건성 연못이 일반적으로 많이 이용되고 있다. 호기성 연못은 흔히 마무리연못(Fig. 1의 Pond 3)으로 사용되며 처리수의 녹조(algae)를 침전시키는 기능을 한다.

Fig. 1은 축산폐수 처리 및 재활용 실험 연못시스템의 개념도이다. 1차연못(Pond 1, 조건성) - 2차연못(Pond 2, 조건성) - 3차연못(Pond 3, 마무리 연못, 호기성)으로 시스템을 구성하였으며 1차연못 바닥에 메탄발효 Pit를 설치하였다.

처리수를 양어지에 관수하여 양어를 하거나, 3차연못에 먹이 공급 없이 직접 양어를 할 수 있으며, 처리수를 유기농업에 관수하여 조류(algae)를 퇴비화할 수 있다.

실험 연못시스템은 전라남도 봉황면 전남대학교 젓소 사육장부지에 설치하였다. 착유실의 세척과 우방에서 내려오는 축산폐수의 평균 BOD₅가 400 mg/l 이나 안전성을 고려하여 유입폐수의 설계 BOD₅를 500 mg/l 로 설정하였다. 일일 평균유량은 4.5m³ 이나 안전성을 고려하여 설계유량을 5 m³ 로 하였다. 일일 설계 BOD₅ 부하량은 2.5kg 이다. 유입폐

수는 Pit - 1차연못 - 2차연못 - 3차연못으로 이동한다.

Pit의 구조

Fig. 2는 1차연못, Pit의 구조와 기능, 가스회수 시설의 구조를 보여준다. Pit는 내부 면적이 3.24 m² (1.8 m x 1.8 m), 깊이가 연못바닥 지하 1.6 m, 연못바닥 위 1.5 m로 체적이 10 m³인 콘크리트 구조이다. 설계유량이 5 m³/day로 Pit의 폐수체류시간(hydraulic residence time)이 2 day, 월류유속(overflow velocity)이 1.5 m³/m²/day' 가 된다.

Pit의 구조는 2 - 3m/sec의 강한 바람이 불어 용존산소가 많은 상층의 물이 연못제방에 부딪쳐(surface drift) 연못바닥으로 이동하는 경우가 발생하여도 Pit내부로 용존산소 침투가 차단되어 Pit의 메탄발효가 보호되도록 설계하였다.

폐수는 Pit바닥으로 향하여 유입된 후 서서히 Pit상부로 이동하며 유기물입자와 기생충 알이 Pit 바닥에 침전된다. 혐기성상태에서 유기산생성 박테리아와 메탄 박테리아가 유기물의 표면에 증식하면 가스가 유기물 표면에 발생하여 일부 유기물이 부상하게 된다. 부상한 유기물이 Pit상부에 도달하면 수압차이로 가스가 터져 유기물은 다시 Pit바닥으로 침전한다. 이런 운동이 지속적으로 일어나면서 슬러지의 분해가 촉진된다. Pit에 슬러지 퇴적량이 많아 Pit의 기능이 떨어질 경우 유입파이프에 연결된 수압파이프에 수압을 가하여 Pit내부에 쌓인 슬러지를 1차연못바닥으로 이동시켜 연못바닥의 메탄발효에 의해 분해되도록 설계하였다.

가스회수 시설은 Pit바닥에서 발생한 메탄가스가 Pit의 상단부분에 설치된 공기가 투과되지 않는 우산모양의 천막으로 집적되어, 가스통과 구멍을 지나 상단에 고정된 스텐레스 집적통을 거쳐 가스측정기에 도달하도록 설계하였다. 가스집적 천막의 평면적이 2.25 m²로 Pit 바닥의 슬러지층 표면적 2.25 m²에서 발생하는 가스를 포집할 수 있으며, Pit 내부의 온도, pH, 슬러지침전 등 Pit환경을 조사할 수 있다.

결과 및 고찰

초기 폐수처리 수준

1996년 11월부터 폐수를 연못시스템으로 유입시켜 1997년 1월부터 10월까지 일주일 에 두 번 샘플을 채취하여 처리 정도를 분석하였다. Table 1은 유입폐수와 각 연못처리수의 평균 COD, BOD₅, SS, TN, TP와 처리수준을 나타낸다. 유입폐수의 평균 BOD₅는 398.7mg/l 이며, 1차연못, 2차연못, 3차연못 처리수의 평균 BOD₅는 각각 49.1mg/l, 27.9mg/l, 19.8mg/l 이다. 1차연못, 2차연못, 3차연못에서 유입폐수 BOD₅의 88%, 93%, 95%가 제거된다. 유입폐수의 평균 SS는 360.5mg/l 이며, 1차연못, 2차연못, 3차연못 처리수의 평균 SS는 각각 53.4mg/l, 45.7mg/l, 32.7mg/l 이다. 1차연못, 2차연못, 3차연못에서 유입폐수 SS의 86%, 88%, 91%가 제거

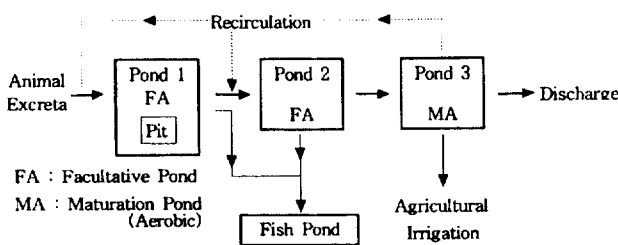


Fig 1. Design concept of the demonstration integrated pond system

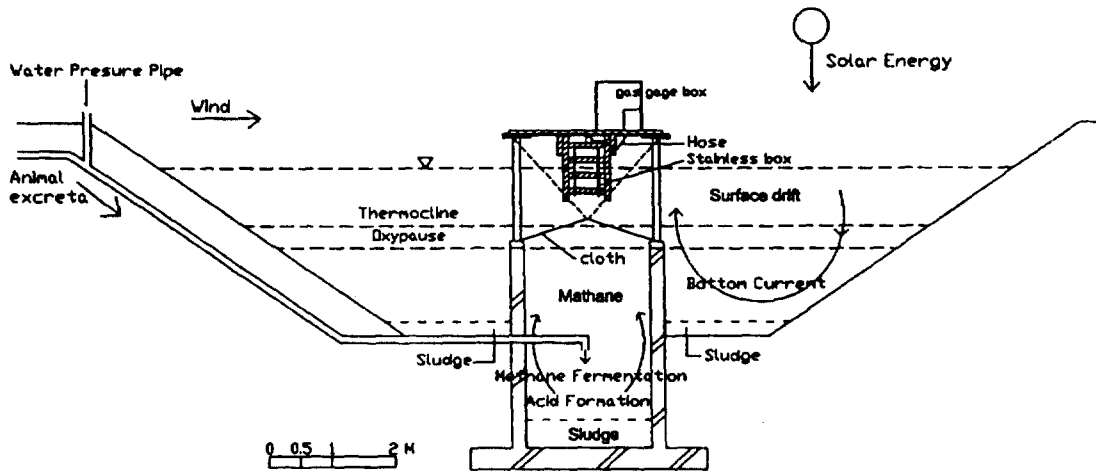


Fig. 2. Structure and Function of Primary Pond and Pit

된다. 유입폐수의 BOD₅, SS가 1차연못에서 대부분 제거됨을 알 수 있다. 실험 연못시스템의 처리효율은 인용문헌 5번 (Yang, 1998)에 자세히 설명되어 있도록 하였다.

1차연못 및 Pit의 반응

Fig. 3은 1997년 8월 맑은 날 2시경 수심에 따른 1차연못의 온도, DO, pH 변화를 보여준다. 1차연못은 조건성 상태를 유지하고 있으며 수심이 0.3m 깊어지면 수온이 약 1°C 내려간다. 일반적으로 연못이나 호수에서 수심 약 1m마다 수온이 약 1°C 내려가나 강한 태양열 아래서는 수온의 변화가 많음을 알 수 있다. 수심 약 1m 깊이에서 thermocline이 형성되고 0.5m에서 oxypause가 형성된다. Pit 내부는 혐기성이며 pH가 7.1이다.

Pit의 메탄발효

1996년 11월부터 Pit로 축산폐수를 유입시켰다. 가스는 1997년 3월부터 미량이 발생하기 시작하여 1997년 5월에는 포집이 가능할 정도로 발생하였다. 발생한 가스량은 가스메타기로 측정하였으며 일주일에 한번 샘플을 포집하여 분석하였다.

연못바닥의 Pit는 고형유기물의 침전과 제거가 중요한 설계기준이 된다. 소화조 혹은 침전조 설계에서 고려하는 체류시간과 월류유속은 Pit를 설계하는데도 유용한 설계인자가

된다. 미국 토목가협회에서 권장하는 설계기준에 의하면 체류시간이 2시간이고 월류유속이 50 m³m²day⁻¹ 인 침전조는 BOD 25%, SS 55% 제거가 가능하며, 체류시간이 1일이고 월류유속이 2 m³m²day⁻¹ 인 침전조는 BOD 60%, SS 80% 제거가 가능하다. 이들 설계기준을 적용하면 Pit의 BOD 제거율이 약 50-60%로 예측된다.

Fig. 4는 포집한 가스의 CH₄, N₂, CO₂의 구성비율을 나타내며, Fig. 5는 Pit바닥(수심 3.5m), 연못바닥(수심 2.5m), 연못상층(수심 0.3m)의 온도를 보여준다. Fig. 4에서 CO₂ 구성비율은 1% 이하로 극히 적으며 거의 CH₄와 N₂로 구성되어 있다. 실험기간 동안 Pit내부는 혐기성으로 평균 pH가 7.2였다.

Fig. 4에서 5월 25일과 6월 2일의 CH₄와 N₂의 구성비율이 현격한 차이를 보인다. CH₄가 19.6%에서 88.8%로, N₂가 80.2%에서 10.5%로 급격히 변화하였다. Fig. 5에서 5월 19일, 5월 26일, 6월 2일의 Pit바닥 온도가 14.4°C, 15.5°C, 16.0°C로 Pit의 바닥온도가 14.5°C 정도이면 N₂의 함량이 80%이며, 16°C에 이르면 CH₄의 함량이 88%에 달한다. 메탄발효가 원활히 일어나려면 슬러지층의 온도가 16°C가 되어야함을 알 수 있다. Fig. 5에서 Pit 내부의 온도는 급격한 변화없이 점진적으로 증가하거나 감소하고 있어 박테리아의 활동에 좋은 조건이 된다. Fig. 6은 Pit 바닥면적 2.25 m²에서 발생한 월별 메탄가스량을 나타낸다. Pit의 일일 메탄가스 발생량

Table 1. Treatment Level of Each Pond Effluent

	Influent		Pond 1		Pond 2		Pond 3	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
COD (mg/l)	556.5	25.4	61.5(89%)	11.0	41.6(93%)	4.7	30.1(95%)	2.9
BOD ₅ (mg/l)	398.7	20.7	49.1(88%)	7.0	27.9(93%)	4.3	19.8(95%)	3.0
SS (mg/l)	360.5	16.6	53.4(86%)	8.8	45.7(88%)	9.7	32.7(91%)	4.4
TN (mg/l)	206.8	13.1	48.6(77%)	8.4	30.8(86%)	4.6	21.0(90%)	2.6
TP (mg/l)	20.7	1.3	5.3(75%)	1.0	3.2(85%)	0.9	2.1(90%)	0.6
pH	7.1	0.1	8.8	0.8	9.5	0.8	9.3	0.3

a) (%): Removal Rate Compared with Influent Concentrations

b) SD : Standard Deviation

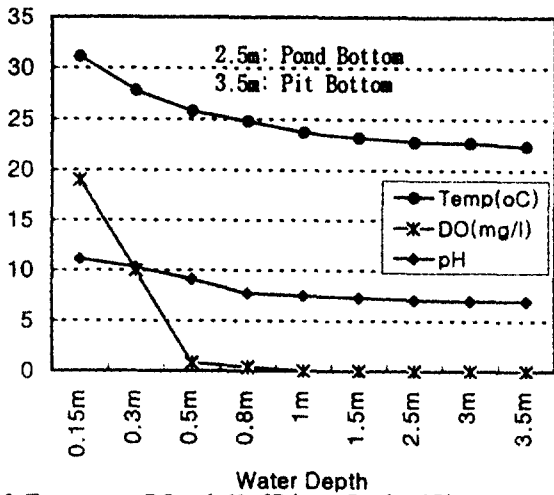


Fig 3. Temperature, DO and pH of Primary Pond and Pit

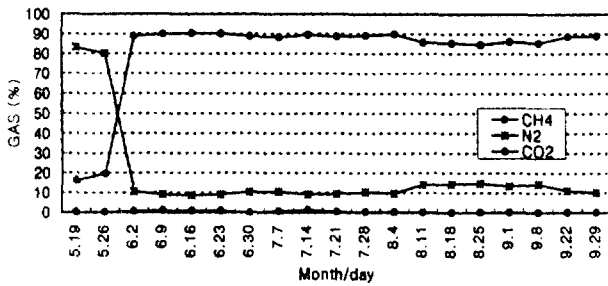


Fig. 4. Composition of Biogas Produced from Pit

은 5, 6, 7, 8, 9월에 각각 0.12, 0.56, 0.58, 0.45, 0.37 l/일이다. Pit에 쌓인 슬러지의 깊이는 5.7 cm/year로 측정되었다.

Pit가 설치되지 않은 하·폐수처리 조건성연못 연구에 의하면 메탄박테리아는 14°C에서 거의 활동을 멈추게 되어 슬러지가 쌓이기 시작하며, 19°C에서는 일일 슬러지 침전량과 분해량이 같아지고, 24°C에서 왕성한 활동을 하여 분해량이 침전량보다 많아진다.¹⁰⁾ 실험 메탄발효 Pit는 연못바닥보다 3°C 낮은 16°C에서도 메탄발효가 원활히 일어난다. Pit가 연못바닥보다 용존산소 차단이 용이하고 혐기성 및 중성 pH를 유지하기 쉽고 온도변화가 적도록 설계되었기 때문이라고 본다. 남미 볼리비아의 La Paz에서 운영 중인 연못시스템은 연못바닥의 온도가 8°C에서도 메탄발효가 활발히 일어난다.¹¹⁾ 고원기후로 연못의 온도변화가 상대적으로 적기 때문이다. Pit의 온도변화를 줄이면서 유입폐수의 온도를 활용하면 Pit의 메탄발효 기간을 연장할 수 있을 것으로 예측된다.

Table 1에서 조건성연못인 1차연못에서 많은 양의 질소가 제거된다. 이는 유기물에서 세포생성에 필요한 영양소를 획득하는 타영양성(heterotrophic) 미생물에 의한 질산화(nitrification)와 탈질소화(denitrification) 작용에 기인한다.¹²⁾ 조건성연못 바닥에서 포집한 가스의 구성비율이 CH₄ 59%, N₂ 23%, CO₂ 16%이나 연못상층에서 포집하면 구성비율이 CH₄ 90%, N₂ 10%, CO₂ 2%로 변한다는 연구보고가 있다.¹³⁾

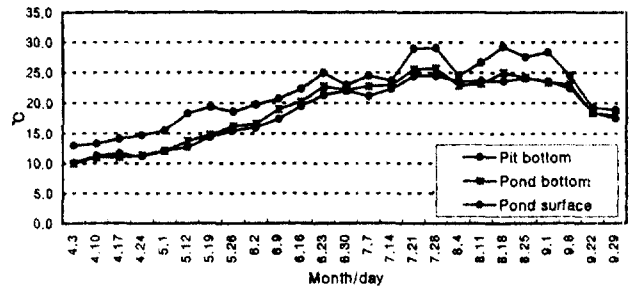


Fig 5. Temperatures of Pit Bottom, Pond Bottom and Pond Surface

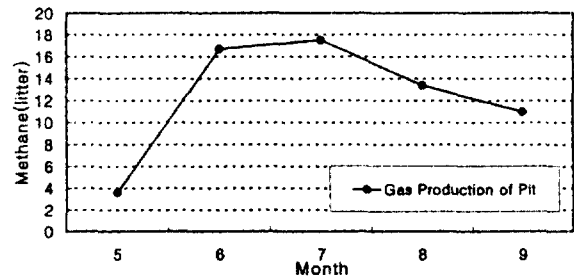


Fig 6. Monthly Methane Production of Sludge Surface of 2.25 m³ of Pit

이는 탈질소화가 수중에서 일어나고 있음을 의미하며 대부분의 CO₂가 수중에서 용해되는데 기인한다. Fig. 4에서 메탄발효가 원활할 때 Pit의 바닥에서 발생하여 연못상층에서 포집한 가스의 구성비율이 CH₄ 90%, N₂ 9%, CO₂ 1%이다. Pit의 바닥에서 발생한 CO₂가 연못상층으로 이동하면서 거의 용해되어 정제된 CH₄을 회수할 수 있다.

요 약

유입폐수의 BOD₅가 1차연못에서 88%가 제거되고 있어 Pit의 BOD₅ 제거효율이 60%에 달할 것으로 예측된다. 메탄발효 Pit의 환경조건으로 용존산소가 없고, 혐기성 및 중성 pH가 유지되어야 하며, 충분한 체류시간이 확보되어야 하고, 온도변화가 적어야 한다. 분석결과 실험 메탄발효 Pit는 이런 조건들을 만족시키고 있어 Pit설계가 적절함을 알 수 있다. 실험결과 메탄발효 Pit의 설계인자로 폐수체류 기간이 2 day, 율류유속은 1.5-2 m³m²day⁻¹가 적합하며, Pit바닥의 수심은 슬러지층의 온도와 밀접한 관계가 있어 3-3.5m 정도가 적합한 것으로 사료된다. Pit 바닥의 슬러지층 온도가 16°C이상으로 유지되어야 메탄발효가 원활히 일어난다.

우리나라 중부지방과 기후조건이 유사한 지역에 위치한 연못시스템 연구에 의하면, 연못바닥의 온도가 메탄박테리아 활동이 거의 정지하는 14°C 이하로 내려가는 기간이 약 7 개월이 된다.¹⁴⁾ 온대권의 연못시스템은 연간 슬러지 침전량이 분해량보다 많아 어느 정도 슬러지가 쌓이게 된다. 따라서 여분의 30cm 수심을 두어 10-20 년에 한번 슬러지를 제거하도록 설계한다. 실험 연못시스템이 설치된 장소는 중부지방보다 평균기온이 약 3 - 4°C 높은 지역으로 연

못바닥 지하 1.5m에 위치한 Pit의 수온이 14℃이하가 되는 기간이 Fig. 5에서 약 6 개월이 된다.

실험 메탄발효 Pit는 좁은 면적의 연못에 설치하기 위해 콘크리트구조로 만들었으나, 1차연못의 규모가 크면 토공만으로 Pit설치가 가능하여 비용이 적게 든다. Pit에서 발생한 가스가 연못상층으로 이동하면서 CO₂가 해리되어 정제된 메탄을 회수할 수 있다. 메탄발생이 왕성한 기간에 연못상층에서 포집한 가스는 거의 메탄으로만 구성되어 있어 축산폐수를 처리하면서 메탄가스를 회수하여 연료로 사용하는 것이 가능하다. 메탄발효 Pit가 생태적으로 적용하면 초기보다 처리효율이 증가할 것으로 기대되어 지속적인 실험을 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- Oswald, W.J., Green, F.B. and Lundquist, T.J. (1994), Performance of Methane Fermentation Pits in Advanced Integrated Wastewater Pond Systems, *Wat. Sci. Tech.*, 30(12):287-295
- Green F.B., Bernstone, L., Lundquist, Tresan, R.B. and Oswald, W.J., (1995), Methane Fermentation, Submerged Gas Collection, and The Fate of Carbon in Advanced Integrated Wastewater Pond Systems, *Wat. Sci. Tech.*, 31(12):55-65
- Yang, H. (1992), *Ecological Design of Estuarine Environment for a Sustainable Urban Ecosystem*, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley. pp. 103-167
- Yang, H et. al. (1997), A Pond System for Treatment and Recycling of Animal Excreta, Ministry of Agriculture and Forestry
- Yang, H.(1998), Treatment Level of Pond System for Ecological Treatment and Recycling of Animal Excreta. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 19(1): 70-75.
- EPA, (1983), *Design Manual: Municipal Wastewater Stabilization Ponds*, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-625/1-83-015, Washington, D.C. pp. 2-7
- Oswald, W.J., (1988), *A Syllabus on Waste Pond Fundamentals*, University of California, Berkeley, Spring 1988, BEHS 259, pp. 66-68
- WHO, (1987), *Wastewater Stabilization Ponds: Principles of Planning & Practice*, Regional Office for the Eastern Mediterranean Alexandria, WHO EMRO Technical Publication No. 10, World Health Organization
- American Society of Civil Engineers,(1975), *ASCE Manual 36*, ASCE, New York.
- Oswald, W.J. (1968), *Advances in Anaerobic Pond System Designs, in Advances in Water Quality Improvement*, E.F. Gloyna and W.W. Jr. Eckenfelder (Eds.), University of Texas Press, Austin, pp. 186-194
- Oswald, W.J. (1989), *Bolivia Sojourn 1989*, Presented before a Seminar held at the University de San Simon, October 1-10, 1989.
- Verstraete, W. and Alexander, M. (1973), Heterotrophic denitrification, *Appl. Microbiol.* 7:39-42
- Oswald, W.J., Green, F.B. and Lundquist, T.J. (1994), Performance of Methane Fermentation Pits in Advanced Integrated Wastewater Pond Systems, *Wat. Sci. Tech.*, 30(12):287-295
- Yang, H. (1995), Application of a Pond System to Korea for Treatment and Recycling of Wastewater, *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 9(2):108-117