

(10차 춘천바이오테크놀로지포럼 발표자료, '07.9.11)

한국형(농가형), 가축분뇨 메탄가스생산 기술

축산과학원 축산환경과 박치호

1. 가축분뇨 메탄생산량

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006)의 축종별 분뇨의 최대 메탄발생 가능량(VS_{added} kg 당 m^3 , 북미 지역 기준)은 젓소, 육우, 비육돈, 번식돈, 산란계, 육계의 평균 체중을 기준으로 각각 0.24, 0.19, 0.48, 0.48, 0.39, 0.36 m^3 CH_4/kg VS_{added} 이다.

○ 축종별 분뇨의 최대 메탄생산 가능량(m^3 CH_4/kg VS , 북미지역 기준)

축종	최대 메탄발생량 (m^3 CH_4/kg VS)	VS 배설량 (kg $VS/head/day$)	체중기준 weight(kg)
젓소	0.24	5.4	604
비육우	0.19	2.4	389
비육돈	0.48	0.27	46
번식돈	0.48	0.5	198
산란계	0.39	0.02	1.8
육계	0.36	0.01	0.9

※ 양돈분뇨의 COD_{cr} 농도는 VS 의 약 2배

황 등(2006)이 보고서에 인용한 양돈분뇨 이론적 메탄생산 가능량은 520 ℓ CH_4/kg VS , 생분해율 40~80%기준 메탄생산 210~410 ℓ CH_4/kg VS_{added} 이다.

박 등(2000)이 보고한 내용을 보면 돼지분뇨의 유기물질에서 전형적인 메탄 생산량은 휘발성고형물 감소율 50%시 300 ℓ /kg VS 이며, CSTR Type 소화조의 메탄 발생량은 260 ℓ /kg $VS_{added} \cdot day$ (Hashimoto, 1983), 290 ℓ /kg $VS_{added} \cdot day$ (Steven & Schulte, 1979), 190 ℓ /kg $VS_{added} \cdot day$ (洪 등, 1987,대만)이다.

축종별 Biogas 발생량은 아래 표와 같이 돈분과 계분이 가장 많다.

○ 축종별 가축분뇨의 Biogas 발생량(Werner 등(1986))

축분종류	Biogas 발생범위 (ℓ /kgVSadded)	평균 biogas 발생량 (ℓ /kgVS)
돈분	340-550	450
우분	150-350	250
계분	310-620	460
마분	200-350	250
면양분	100-310	200
밀짚등 고간류	180-320	250

* 일반적인 VS 분해율 60%

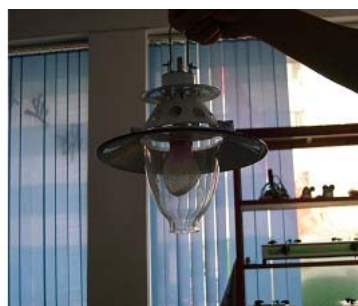
2. 국내 메탄가스시설 이용 실태조사

1)메탄가스 이용성에 대해 1일 분뇨처리 물량 20톤 내외의 중규모 양돈농가 2개소를 조사한 결과, 가스이용 방법에서 공통적인 문제가 있었다.

단순히 난방용 보일러 또는 폐가축 소각용 에너지로 설비가 갖추어져, 실제 난방이 필요치 않은 7개월(봄, 여름, 가을) 동안은 혐기소화시설이 무용지물로 취급되어 관리가 소홀해 지는 원인이었으며, 개선방법으로는 난방용 보일러만이 아닌 4계절 연중 가스이용을 가능하게 하는 설비, 즉 취사용, 가스전등, 열교환 냉난방기, 발전기 등이 포함되어야 한다.



(취사용)



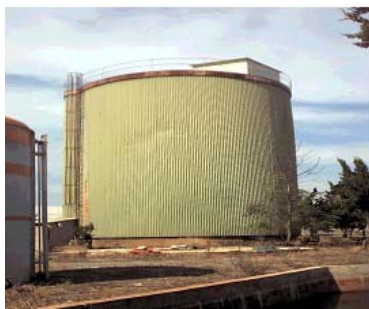
(가스전등)

1) “가축분뇨 처리를 위한 Biogas 이용기술 개발 보고서”(2002, 농촌진흥청)

바이오가스 생산량은 대규모 A 농가에서 1일 양돈분뇨 28톤 투입기준 150~200m³, 대규모 B 농가는 1일 양돈분뇨 100톤 투입시 700~1,000m³였으며, 중규모 농가의 경우 농장주의 시설관리 소홀로 가스발생량 조사가 불가능하였다.

시설관리 및 운전에 대해, 1일 양돈분뇨 처리물량 50~100톤 물량 2개소를 조사한 결과, 소화조 정상가동 실패는 겨울철 소화조 운전에 가장 큰 원인이 있었다. 35℃ 내외로 유지되어야 하는 소화조가 겨울철 관리 소홀로 소화조 온도가 급격히 저하되고 메탄생산량이 감소 할 때, 보일러 가온에 소요되는 과도한 연료비로 인해 정상적으로 유지되기가 어려워진다. 따라서 메탄가스 발생은 더욱 감소하여 정상적인 소화미생물상 유지는 실패하게 된다.

○ 대규모 양돈농가의 메탄시설



소화조 내 미생물상 회복에 소요되는 기간은 3개월 이상으로 7, 8월경에 와서야 정상적인 메탄가스 생산이 가능하게 된다. 또 다시 동절기가 되면 같은 문제가 반복된다.

소화액 처리는 중규모 양돈농가 2개소에서 소화액 전량을 농경지로 환원하는 방법을 택하고 있으나 경작농가에서는 작물이 없는 시기, 즉 봄, 가을만 시용하기를 원하고 있어 별도의 장기저장시설이 필요로 하나 조사농가 2개소 모두 2개월 정도의 저장만 가능한 탱크를 가지고 있었다. 다행히 한 농가는 축산폐수공공처리장 인근에 위치하여 톤당 5,000원 비용으로 위탁처리하여 문제를 해결하고 있었다.

대규모 양돈농가 2개소 모두 정화처리시설을 보유하고 있으나 매우 복잡한 공정을 보유하고 있었다.

- 대규모 A농가 정화처리공정

혐기소화조 → 응집 → 탈수 → 활성오니정화 → 탈질(혐기) → 응집
→ 침전 → 방류

- 대규모 B농가 정화처리공정

혐기소화조(1,500m³) → 응집 → 탈수 → 폭기 → 활성오니정화 → 전기
분해 → 침전 → 응집 → 방류

○ 대규모 양돈농가의 소화액 정화시설



가축분뇨로부터 에너지를 생산함으로써 얻어지는 경제적 효과와 시설투자(1일 100톤 규모의 설치비용 14.6억원, 정화시설 포함 시 30억원) 및 운영비용을 비교할 때 경제성이 매우 저조하므로 근본적인 개선이 필요하다.

2) 2004년에 완공된 파주시 축분공동처리장의 경우, 시설비 약 104억(지방양여금과 도비를 포함한 보조비율은 77.6%), 1년 운영비는 감가상각비를 포함하여 17억 3,929만원(인건비가 35.4%)이다.

하루 4,000kw의 전력이 생산 되더라도 1년에 약 1억5천만원(kwh 당 100원으로 계산)으로 연간서 운영비의 약 9%에 지나지 않아 경제성이 매우 낮다.

인용자료에 의하면 현재 수입은 운영비의 약 19.1%에 지나지 않으며, 나머지 80.9%는 파주시의 시비로 충당하고 있다고 한다.

2) “국내여건에 적합한 가축분뇨 바이오가스생산 최적 시스템 연구 보고서”(2006, 농정연구센터)

3. 농가형 메탄생산기술의 실용화 조건

가축분뇨 메탄가스생산 실용화에서 국내 실패와 국외 성공의 차이는 다음의 두 가지가 주 원인이다.

(1) 가축분뇨처리와 메탄가스생산 공정의 적절한 연계성

지금까지 적용된 방법은 “바이오가스공정(CSTR 소화조)+정화 또는 액비경지환원” 방법이였으며 이는 부적절한 연계성을 가진다.

많은 메탄가스를 생산하기 위해서는 유기물 농도가 높아야 하고, 배출되는 소화액 또한 높은 농도를 가질 수 밖에 없으므로 정화처리에는 그 만큼 불리해진다. 특히 질소제거에 많은 노력(비용)이 필요하다.

액비경지 환원방법은 봄, 가을로 한정된 시용시기와 과다한 물량발생(대부분 대규모 시설이므로)으로 처리의 한계성이 있고, 결국에는 위탁처리 또는 정화시설을 설치해야 하는 입장에 처하게 된다. 에너지 생산이 경제적 이득을 추구하고자 하는 것이 주 목적 인데 시설비용과 운전비 등의 경제적 비용 부담만 가중되는 결과를 초래한다.

서구의 성공사례는 메탄시설이 도입되기 전에 가축분뇨가 농경지로 환원되어 처리되는 방법이 이미 정착되어 있었고, 추가적으로 메탄가스시설만 도입되면서 에너지생산 뿐만 아니라 기존 분뇨처리(액비화)의 효율성까지 개선(악취감소, 성분균일성 등)되는 플러스적 요인만 발생하기 때문에 적절한 연계성을 가진다.

따라서 국내 양돈농가에 메탄가스시설을 설치 할 때는 분뇨처리가 완벽히 이루어지는 사전 조건이 필요하다. 그렇지 않다면 메탄생산 효율은 다소 낮지만 분뇨처리가 완벽히 이루어 질 수 있는 통합시스템(“메탄+소화액처리”)의 개발이 필요하다.

(2) 메탄시설 소비에너지와 생산에너지의 관계, 처리효율의 안전성

외국 사례를 보면 대부분 기온이 높은 열대 또는 아열대 지역에 메탄시설이 분포되어 있다. 우리나라는 1년 중 최저기온이 영하로 떨어지는 기간이 약 5개월 이므로 생산된 에너지를 자체 메탄생산조 온도를 35℃로 유지하는데 많이 소모될 수 밖에 없고 그 만큼 비효율적이다.

그리고 정상운전을 위해 필요한 몇 가지 요인들이 있으나 가장 중요한 것이 메탄생산조의 온도와 소화조 내 유기물 유입량을 일정하게 유지하는 정교한 시설관리이다(경험에 의하면 다소 낮은 온도일지라도 온도의 변화 폭을 줄이는 것이 중요하다).

따라서 메탄생산 효율은 낮을지라도 시설관리가 용이하고 외부환경에 안정성이 확보되는 조건이 전제되어야 한다.

(3) 종합

국내 축산농가의 메탄시설 정착방법은, 대규모 소수 보다는 다수가 이용하는 형태로 되어 메탄관련 업체가 많이 생성되고 산업으로서의 안정된 위치를 확보하는 것이 중요하다.

○ 상용화 되고 있는 메탄관련 상품 - 중국



(가스램프)



(가스 수분제거)



(가스 황제거, Fe_2O_3)

축산농가 입장에서 메탄시설은 분뇨처리(양질액비 생산), 악취 및 온실가스 방지의 수단으로서도 그 효과는 인정 될 수 있다고 생각한다.

국가적 차원에서 본다면 1일 1,000m³의 메탄시설이 100개 있는 것과 1일 100 m³(양돈규모 1,000~2,000두)의 메탄시설이 1,000개 있는 것과는 같다고 볼 수 있으며, 그 효과로서 안정된 시장이 형성되고, 기술의 진보가 지속적으로 진행 될 것이다.

첫 번째 출발은 축산에서의 온실가스과 악취의 주범으로 자리잡고 있는 분뇨 저장조를 저비용으로 혐기화시키고, 보다 용량이 큰 저장조라면 간이형 메탄 생산조로 개선 할 수 있을 것이다.

○ 저비용 혐기소화조 제작 - 중국



(Glassfiber)



(Glassfiber plastic 제작)



(완성된 커버)

두 번째는 농가가 보유하고 있는 분뇨처리시설과 메탄시설을 효과적으로 연계할 수 있는 저비용 기술, 또는 분뇨처리와 메탄생산을 겸할 수 있는 저가의 통합시스템 개발이 필요하다.

○ 농가형의 메탄생산 시설 - 중국



(plug plow type)



(UASB type)

마지막으로 공동처리장 또는 대규모 축산농가에 기술 집약형의 고효율 메탄 시설의 보급도 동반되어 효과적인 대체에너지 생산, 온실가스 방지, 기술의 선도를 꾀해야 될 것이다.

4. 퇴비화시설을 이용한 메탄생산·이용 기술(SES²)

축산과학원('96~'01)에서는 동절기 가온에너지가 필요 없는 메탄생산과 소화액 처리(증발 또는 무취 액비생산)를 겸할 수 있는 방법을 개발하였고, 일부(정화 처리, 액비 작물이용 등)는 진행 중이다.

본 시스템은 일종의 퇴비화 및 퇴비단여과시설인 SCB공정과 메탄가스를 생산하기 위한 혐기소화공정으로 복합 구성된다.

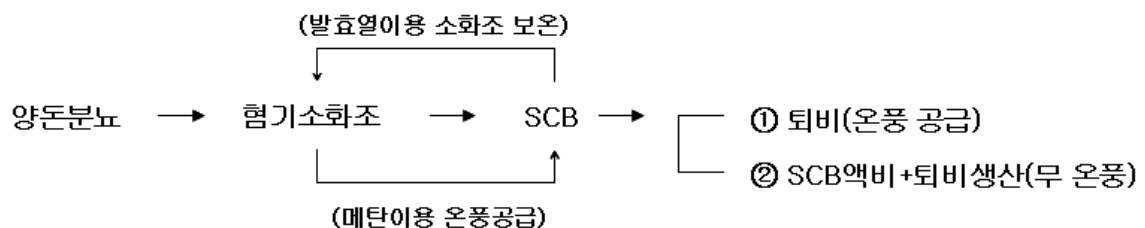
SCB시설의 퇴비화 열 등 폐 에너지가 혐기소화조의 적정온도를 유지시키고, 소화액은 SCB시설에서 증발처리(메탄가스를 이용하여 온풍공급)되거나 여과되어 배출 된다.

배출된 액(SCB액)은 퇴비단을 통과하는 동안 물리·생물분해 과정을 거치기 때문에 수질오염 성분이 획기적으로 제거된 저농도의 무취·균질특성을 가지게 되고, 동시에 퇴비단 부자재의 분해산물(humic)과 유용 미생물을 다량 함유함으로써 양질의 비료로 이용된다.

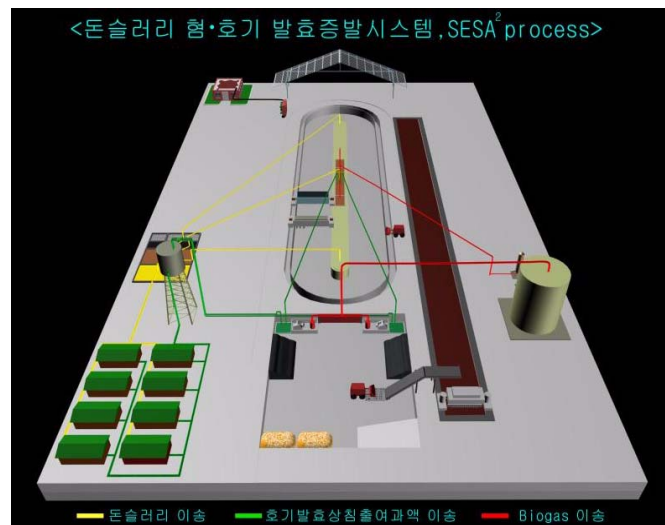
또한 SCB액은 저농도이면서 부식질 형태의 유기물로 구성되어 있어서 화학적, 물리적(응집, 막분리)방법으로 쉽게 제거되기 때문에 액비 사용이 곤란한 경우 정화처리가 용이한 특성을 지닌다.

다시 말해서 분뇨 내 유기물을 최대한 자원(비료, 에너지)으로 생산 이용하고, 나머지는 쉽게 정화처리 할 수 있어 최근 대두되고 있는 대체 에너지 생산과 온실가스 방지, 수질오염 문제 등에 효과적으로 기여 할 수 있는 기술이다.

○ 시스템 공정



○ SESA² 모식도



본 시스템의 Checking Point는

- ① 혐·호기공정 각각의 개별적 처리효과
 - 메탄생산, 퇴비화(증발)처리, SCB(퇴비단여과)처리- 무취의 양질액비 생산
- ② 혐·호기공정 상호 연계 효과
 - 퇴비화 열에 의한 혐기소화조 보온
 - 메탄 에너지 이용 퇴비화시설 온풍공급 → 수분증발

○ 실물규모의 Pilot시설(축산원) : 메탄생산+퇴비화 및 퇴비단여과(SCB)



가. 메탄가스 생산

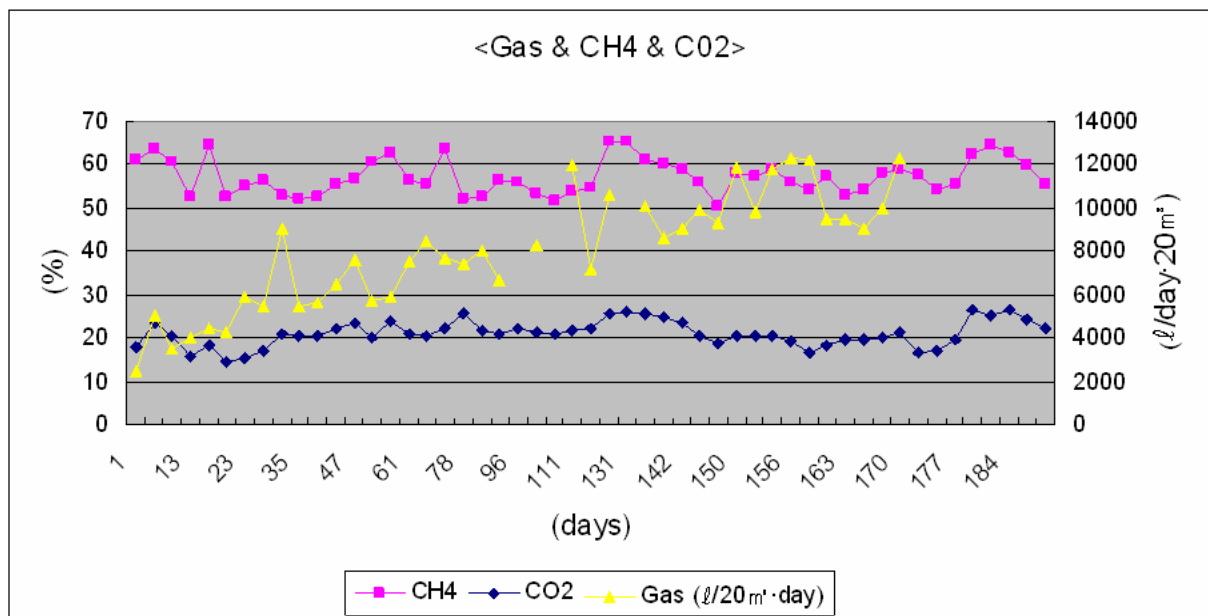
‘97년 6월5일~12월8일 동안, 혐기소화 공정의 메탄생산량은 초기가동 150일 이 후부터 안정성을 나타냈으며 CODcr 및 VS 투입량 기준 각각 116 ± 36.3 , $221\pm58.9 \ell/\text{kgCOD} \cdot \text{day}$ 였다. 이때 소화조 유기물 부하량 $3.02\text{kgCOD}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$, $1.56\text{kgVS}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$, 소화조 온도 $25\sim36^\circ\text{C}$ 였다.

Biogas 137.5m^3 로 가정용 보일러($20,000\text{kcal}$)를 17시간 30분 가동 할 수 있었으며, 30 m^3 탱크에 $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 로 압축저장 할 수 있었다.

○ 메탄생산 효율

구 분	Biogas 생산량(ℓ)	CH ₄ (%)	CH ₄ 생산량(ℓ)
소화조 용적기준	$518.0\pm69.4/\text{m}^3 \cdot \text{day}$	$57.4\pm3.3\%$	$297\pm39.8 \ell/\text{m}^3 \cdot \text{day}$
CODcr 투입량 기준	$202.7\pm63.2 \ell/\text{kgCOD} \cdot \text{day}$		$116\pm36.3 \ell/\text{kgCOD} \cdot \text{day}$
VS 투입량 기준	$384.4\pm102.6 \ell/\text{kgVS} \cdot \text{day}$		$221\pm58.9 \ell/\text{kgVS} \cdot \text{day}$

* 메탄생산량 : 평균 288ℓ 의 76% 수준



나. 혐기소화조 온도

‘97.11.15~12.19(1차)과 ‘98.12.26~1.15(2차) 동절기 시험을 2회 실시하였다. 외부 투입에너지 없이 퇴비화시설의 전도열과 구동기기 폐열을 이용한 결과(2차 시험) 외기온 -9~17℃(평균 1.6℃)에서 소화조 내 온도는 최저 29℃, 최고 37℃, 평균 33℃를 나타내어 추가 에너지공급은 불필요 하였다.

○ 실물규모의 Pilot 시설(축산원)



(시험시설 하우스)



(1차)



(2차)

○ 겨울철 혐기소화조 온도

구분	1차 ('97.11.15~12.19)		2차 ('98.11.9~1.19)	
	외기온(실내)	소화조	외기온(실내)	소화조
평균	5.1	24.9	1.6	33.0
최소	-11.5	21.0	-9	29.0
최대	22.5	27.5	17	37.0

다. 메탄가스 이용 퇴비화시설 가온(중발)

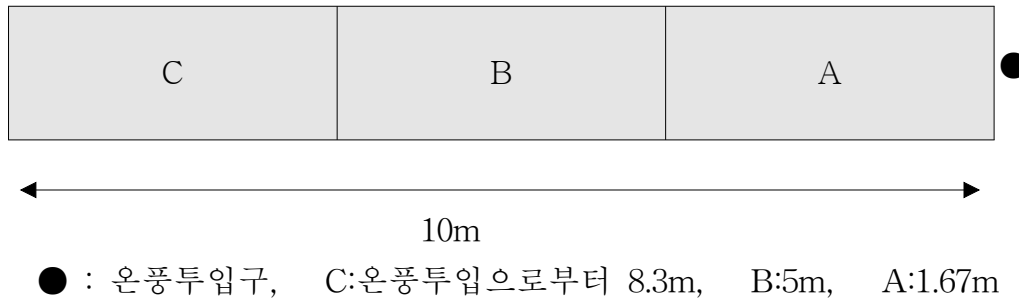
(1) 발효상 바닥 온수 공급 - 보일러 이용

메탄가스를 이용하여 퇴비화시설의 바닥에 온수보일러를 이용한 결과 온도상승은 없었으며 실용화의 가온방법은 바닥에 온풍을 직접 공급해야 한다는 결론을 얻었다.

(2) 발효상 바닥 온풍 공급 - 버너 이용

‘01년 12월, 퇴비화시설 바닥에 115~155℃의 온풍을 공급한 결과, 4시간 경과 후 온도변화가 나타났으며, 깊이별로 바닥지점의 온도는 A지점이 각각 6℃, 5℃ 상승하였고, B지점은 각각 2℃, 1℃ 상승하였다. C지점은 모두 1℃ 상승하였다.

○ 발효상 온도조사 지점



○ 바닥 가온 방법



(바닥 온수 공급)



(바닥 온풍 공급)



온풍공급 전에는 수증기 발생량이 전혀 없었으나, 아래 그림과 같이 온풍공급 1시간 이후부터 나타나기 시작하여 4시간 이후는 상당히 많은 양이 발생하여 대류에 의한 증발효과가 나타났다. 교반기가 가동하지 않은 상태(교반기 가동 시 온도변화 발생 때문)의 결과로 교반기가 가동되었다면 더 짧은 시간에 더 많은 증발이 이루어질 것으로 판단된다.

○ 온풍 주입 증발시험



(온풍 공급 후 2시간)



(온풍 공급 4시간 이후)

동절기에 발효상 60m³(30m³)에 온풍 118~155℃를 1일 4시간 공급할 때 버너는 21분 가동되고, 소요되는 LPG는 2,058ℓ, 금액으로 2,120원 이다.

이를 근거로 실용화 시 메탄생산량과 온풍공급 가능 시간을 산하면 아래와 같다.

- 1일 50톤 처리시설의 Biogas 생산량 : 350m³, 메탄생산량 210m³
- 퇴비화시설 용적 2,500m³에 4시간 온풍 주입 시 LP가스 소요량 : 85.9m³
→ 메탄 환산량 : 195.2m³(LNG의 열량은 LPG의 44% 수준, 저발열량 기준)

따라서 발효상 전체용적 2,500m³를 공급 시 1일 4시간 공급 가능하고, 퇴비화시설 용적을 1/4(625m³)씩 나누어 4일에 한번씩 나누어 공급 할 경우 1일 16시간 공급이 가능하다.

라. 퇴비화시설 침출수 배출 - SCB(퇴비단여과)액비 생산

‘98.11.9~’99.6.4(208일간) 시험결과, 당시 퇴비화시설(SCB)의 배출액 특성은 부유물질(SS) 99.6%, 유기성분(BOD) 85%, 질소 66% 제거된 100% 무취였다. 또한 발효상 온도 50℃이상에서 대장균과 살모넬라등 병원성 미생물이 사멸되어 재이용 가능 물질로 판단되어 SCB액비로 명명하였다(‘99 축산원).

‘01.6.12~10.12 동안 액상분뇨 퇴비화시설의 Biofiltering 효과를 알아보기 위한 3개 조건의 시험을 하였다. 오염제거율은 BOD, SS가 각각 91~97%, 94~99%, T-N, T-P는 59~86%, 86~90%로 나타났으나 COD는 60~83%로 BOD 보다는 다소 낮은 제거율을 나타냈다(‘02 축산원)

본 시스템의 일부인 SCB공법은 양돈농가 퇴비화시설의 문제점을 개선하는 주요 수단으로 이용되어, 현재 147개('02~'06) 양돈농가에 설치 이용되고 있다.

○ SCB 액비생산 : 경기도 양돈농가



(슬러리 살포 및 상층교반)



(무취의 SCB액비)

SCB공법으로 기존 퇴비화시설을 개조 할 경우 과잉의 수분은 배출되어 정상적인 퇴비화가 진행되고, 배출된 액(SCB액비)은 무취의 양질액비로 이용되기 때문이다. SCB액비는 잘 정제된 양질액비로서 관비형태로 논에 많이 이용되고 있다. 이천지역의 SCB시용 면적을 보면 ('04) 8ha → ('05) 24 → ('06) 80 → ('07 상반기) 80ha로 급속히 증가하며, 모심는 철에는 품귀현상을 보이고 있다.

○ SCB시설 바닥 배출틀 변천

- SCB 배출틀 설치면적 비율 변경



('98)



('99)



('01)

- SCB 배출틀 재질 변경



(~'04 : 철재 그레이팅)



('04 ~ : 플라스틱 조립형)



마. 실용화

(1) SESA²

본 시스템은 2001년도 산자부 지역에너지시범사업(산자부 보조 13억원)으로 제안, 채택되어 경북 군위축협퇴비공장에 설치계획이었으나 주관부서인 군위 군청의 사정으로 보급이 좌절되었고, 많은 아쉬움이 있다.

본 시스템의 일부인 SCB공법은 양돈농가 퇴비화시설의 문제점을 개선하는 주요 수단으로 이용되어, 현재 147개('02~'06) 양돈농가에 설치 이용되고 있다.

(2) 고효율 메탄생산시설 실증 사례

(가) 1일 10톤 처리규모 실증('05)

대우건설에서 개발한 UASB형 메탄공정을 축산과학원에 설치하여 공동으로 실증시험을 수행하였다.

- 처리공정 : 고액분리 → 산발효조 → UASB형 메탄발효조
- 시설규모 및 처리조건

구분	용량(m ³)	HRT(day)	OLR(kgCOD/m ³ day)
산발효조	15	1.5	6.2
메탄발효조	35	3.5	5.7

- 축산과학원 설치 메탄시설



(산발효조+메탄발효조)



(바이오가스 저장조)

- 바이오가스 발생량 : 80~100 Nm³/일
- 전력생산 : 100~120kwh/일

(나) 1일 20톤 규모 농가설치('07)

대우건설은 축산과학원에서의 실증시험 결과를 토대로 1일 20톤 규모의 시설을 농가에 설치가동 중이다.

- 설치장소 : 경기 이천시 모전양돈영농조합법인
- 처리공정 : 고액분리 → 산발효조 → UASB형 메탄발효조
- 시설규모 및 처리조건

구분	용량(m ³)	HRT(day)	OLR(kgCOD/m ³ day)
산발효조	40	2	16.7
메탄발효조	100	5	8~10

- 모전양돈영농조합법인 설치 메탄시설



(산발효조+메탄발효조+가스저장조)



(가스 발전기 : 30kw)

- 메탄가스 발생량 : 160~200 Nm³/일
 - 원액 투입량 기준 평균 13m³/톤/일의 61.5~77%
 - ※ 원액 투입량 20m³/일
 - VS 투입량 기준 평균 288ℓ/kg/일의 139%
 - ※ 메탄조 VS 투입량 450kg/일, 메탄발생량 180m³/일
 - VS 투입량 환산 : COD 투입량의 50%
 - ※ COD 투입량 기준 평균 144ℓ/kg/일의 139%
 - COD 투입량 900kg/일 - OLR : COD 9kg/m³ → 100m³
- 전력생산 : 350~510kwh/일
- 시설비 : 10억원

<인용문헌>

- 박치호, 한정대 등, 2000. 돈 슬러리 혐호기 발효증발 시스템 실용성 확립, 농촌진흥청 시험연구보고서.
- 박치호 등, 2002. 가축분뇨처리를 위한 Biogas 이용기술 개발(축산분뇨를 이용한 Biogas 생산이용 현장적용 기술), 농촌진흥청 시험연구보고서
- 박치호 등, 2007, 농림기술개발과제 제안요구서 작성 자료, 농림부
- 박우균 등, 2002, 가축분뇨처리를 위한 Biogas이용기술개발, 농촌진흥청 시험연구보고서)
- 황수철 등, 2006, 국내여건에 적합한 가축분뇨 바이오가스생산 최적시스템 연구 보고서, 농정연구센터
- 홍승모 등, 2007 메탄 실증보고서 및 발표 자료(대우건설)