

## 가축분뇨액비저장조 침전물 퇴적 방지를 위한 2류체 제트노즐식 교반장치 개발에 관한 연구

유병기 · 홍종태 · 김혁주 · 권진경 · 오권영\* · 박병곤\*\*

농촌진흥청 국립농업과학원

## Development of a 2-fluid Jet Mixer for Preventing the Sedimentation in Livestock Liquid Manure Storage Tank

Yu, B. K., Hong, J. T., Kim, H. J., Kweon, J. K., Oh, K. Y.\* and Park, B. K.\*\*

National Academy of Agricultural Science, RDA., Suwon, Korea

### Summary

There are around 7,500 manure tanks to treat the manures from pigs in Korea. In the tank, there are too much sediments deposited on the base and wall, which causes low efficiency of stock capacity and manure fermentation.

In order to minimize sediments and to ferment manure effectively, we developed a 2-fluid jet mixer for mixing sediments in liquid livestock manure tank. For developing the prototype, we tested a factorial experimental system with various nozzles, and simulated CFD models with two kinds of nozzle arrangement. From the results of factorial experiment and CFD simulation, we concluded the dia. ratio of primary : secondary nozzle should be 1:2 and the nozzles should be arranged at the same distances toward to the circumferential direction. With this results, we manufactured a 2-fluid jet mixer which is consists of four 2-phase nozzles, centrifugal slurry pump and root's type air blower. And, we carried out the performance test of the prototype in the round shaped liquid manure tank in the farm. The performance test results showed that the uniformity of TS (Total Solid) and VS (Volatile Solid) was raised from 21.3 g/L, 13.3 g/L In steady state to TS and VS to 23.0 g/L, 14.1 g/L in the mixing operation. Therefore, we could conclude that the prototype of 2-fluid mixer could make the solid material which could be sediments in the tank not to be deposited in the tank and to be contacted to air bubbles which could enhance the efficiency of the fermentation of livestock manure.

(Key words : Livestock liquid manure, 2-fluid nozzle, Sediment, Mixer)

### 서 론

살포할 농경지를 확보한 축산농가나 경종농가에 액비저장조 설치비를 지원한 이래, 2011년 현재 전국에 약 7,500여기가 보급되었으나 2002년부터 정부가 가축분뇨액비를

\* 농업기술실용화재단 (Foundation of Agri. Tech. Commercialization & Transfer)

\*\* (주)다우테크 (Company Dawootech)

Corresponding author : Yu, Byeongkee, National Academy of Agricultural Science, RDA, 126 Suin-ro Gwonseon-gu Suwon, 441-707. Korea.

Tel : +82-31-290-1866, E-mail : ybk@korea.kr

2012년 9월 27일 투고, 2012년 11월 16일 심사완료, 2012년 11월 25일 게재확정

며, 액비 살포비용도 지원하여 가축분뇨를 농경지에 환원시키는데 집중적으로 노력을 기울이고 있고, 2010년부터는 가축분뇨 에너지화 시범사업의 추진 등 경종과 축산의 조화로운 친환경 자원순환농업을 적극적으로 추진하고 있다. 특히 2012년부터는 가축분뇨의 해양 투기가 전면 금지되므로 액비화 처리를 비롯한 육상처리의 중요성이 더한층 강조되고 있다.

축산분뇨의 육상처리 방법에는 퇴비화, 액비화, 정화처리 등의 방법이 있고, 액비화 할 경우에는 호기발효를 하는 경우와 혐기발효를 하는 경우가 있다. 액비화 처리의 경우 혐기발효이든 호기발효이든 액비저장조에 고형침전물이 지속적으로 쌓이면 저장조의 저장용량이 줄어들고 효율적인 발효에 지장을 준다. 이런 이유로 가축분뇨의 혐기발효조 및 액비저장조의 호기발효 시 침전물 쌓임을 방지하고 발효를 촉진시키기 위한 연구가 최근에 많이 수행되고 있다.

혐기발효조에서의 메탄가스의 발생은 휘발성 고형물(Volatile Solid)의 농도가 균일한 경우가 불균일한 경우 보다 가스발생이 촉진되므로 대부분의 발효조에서는 교반기를 사용하고 있고, 혐기발효조 앞에 균등조를 설치하여 균등화 시켜서 공급하는 경우가 일반적이다. 유럽에서는 혐기발효조내 교반방식으로 패들식, 프로펠러식, 간짓대식 교반기 등의 기계교반과 액체에 의한 교반, 가스교반, 기체가압교반 등 다양한 형태의 교반기술을 실용화하여 운영 중에 있다. 현재 국내에서 적용하고 있는 교반방식은 소화조내부에 설치하는 수중믹서 방식, 축형 교반방식, 소화조 슬러지 순환방식 등이 사용되고 있으나, 대부분의 혐기반응조 형태는 완전혼합형(continuously stirred tank reactor, CSTR)으로 수직혼합(vertical mixing)이 지배적이라고 하였다(허, 2005). 김 등(2010)은 유체류동형 고효율 생물반응조에 의한 음식물침출수의

바이오가스 발생특성 연구에서 혐기조에서 교반을 실시하였을 때 소화가스 발생량이 43% 정도 증가하였는데 이는 미생물과 유입되는 음식물침출수와의 접촉면적과 시간이 증대되어 유기물의 분해율이 증가되었기 때문이라고 보고하였다.

오 등(2002)은 가축분뇨 액비저장조의 침전물 쌓임 방지 및 호기발효 촉진을 위해 가축분뇨 액비저장조의 액비위에서 자유롭게 떠다니면서 펌프를 이용 액비를 흡입하여 바닥에 분출하여 침전물을 부유시키는 것과 동시에 벤츄리노즐을 통과하는 유속에 의해 흡입된 공기방울이 가축분뇨액비와 접촉하여 발효를 촉진토록 하는 가축분뇨 교반·폭기장치를 개발하였다. 이 장치를 이용 시험한 결과 교반전보다 교반후 유기물함량이 상하층 공히 농도가 높아졌으며, 이 외에 pH, COD, T/N, T/P 등의 농도가 모두 높아져 교반이 잘 되고 발효가 촉진되는 것으로 보고하였다. 그러나 고정식이 아니 부유 이동식이므로 액비 배출 및 투입시에 어려움이 있고 이동위치를 원하는 대로 컨트롤 할 수가 없어 바닥 전체 침전물을 고르게 부상시키기가 어려웠다.

최 등(2006)은 가축분뇨 액비저장조의 침전물이 많이 쌓여 액비저장용적의 감소로 활용도가 저하하는 문제를 해결하기 위하여 신축붐과 슬러리 펌프 등을 이용하여 저장조의 굳어진 침전물에 저장조 상등액을 펌프로 분사하여 파쇄 교반하여 외부로 반출하는 장치를 개발하였다. 그러나 기계가격이 고가이고 기계의 크기가 커서 보급되지는 못하였으며 침전물이 수년 동안 쌓인 후에 하는 사후 처리방식이라는 한계가 있었다.

호기성 발효를 위한 액비화 처리 유형에는 교반시기에 따라 사용직전 교반, 정기적 교반이 있으며, 처리방법에 따라 펌프의 와류, 송풍기의 산기, 플로트의 교반 등의 방법을 이용하고 있으나, 산기관을 사용하는 경우

슬러지에 의해 산기관이 막히는 경우가 많고, 산기관을 사용하지 않고 블로어로 기체를 공급하는 방식의 경우 기체의 큰 거품이 위로 올라와 침전물의 교반 혼합효과가 높지 않다. 그러나 Parkash (1982)는 혼합조내의 유체를 펌핑하여 제트교반을 하므로 유체에 유동을 만들 수 있고 이 경우 저 점성(粘性)의 대규모 부피에서는 기계적인 교반기보다 효율적으로 교반을 할 수 있고 2류체노즐 제트를 사용한 기체 액체 소용돌이 제트(Eddy-jet) 혼합기는 지름 0.2~0.6 mm의 거품을 만들어 매우 효율적인 접촉기가 될 수 있다고 하였다. 또한 정 (2009)은 제트 노즐을 사용하는 폭기시스템에서 공기입자의 크기가 작을수록 반응조 내의 혼합효과가 증가한다고 하였다.

따라서 본 연구에서는 가축분뇨액비 저장조에서 고형침전물이 누적되어 쌓이는 것을 방지하고 미세한 공기방울을 가축분뇨 액비에 접촉시킴으로 발효촉진도 도모하고자 앞에서 언급된 2류체 제트노즐을 사용하여 교반 혼합하는 것이 효과적일 것으로 판단하여 설계조건 구명시험을 실시하였다. 1차 노즐에서의 액체의 적정 유속을 설정하고, 1차 노즐과 2차 노즐 구경비를 설정하였으며, CFD 이용 유동해석에 의한 노즐 분사구 위치를 설정하였다. 이 결과를 토대로 가축분뇨 액비저장조 침전물 퇴적방지 장치를 제작하여 농가에 많이 보급되고 있는 200톤 규모의 액비저장조에 설치하여 침전물 교반 성능을 평가하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 적정 노즐 설계조건 구명시험

적정 노즐 설계조건을 구명하기 위하여 대부분의 액비 저장조가 원통형인 것을 고려하여 Fig. 1에 나타낸 바와 같은 2류체 노즐을 방사형으로 6구를 배치한 형태로 제작하여

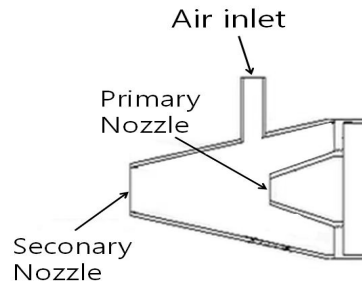


Fig. 1. 2-fluid nozzle section.

공시하였고 (Fig. 2), 펌프는 토출량 0.5 m<sup>3</sup>/min, 양정 21 m인 5.5 kw 용량의 수중펌프이며, 브로워는 정압 39.23 kPa [2.25 m<sup>3</sup>/min]인 3.75 kw 용량의 송풍기로 구성되었다. 요인 시험장치는 Fig. 3에 나타내 바와 같이 수조 내부에 설치하여 1,2차 노즐의 구경 및 1차 노즐 유속을 바꾸어가며 적정 노즐 설계조건을 구명하고자 하였다. 요인 시험장치의 사양은 Table 1에 나타냈다.

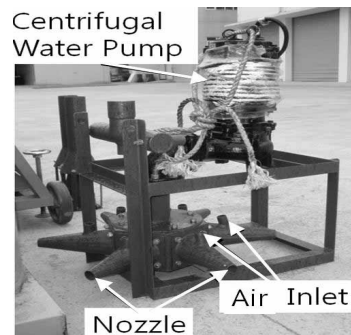


Fig. 2. Pump and nozzle.

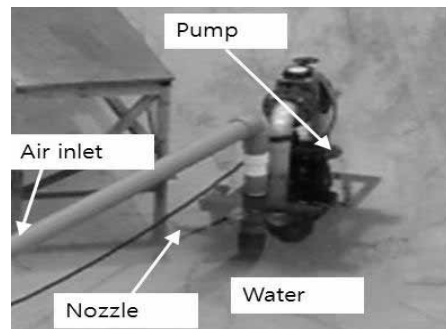


Fig. 3. Photo of factorial experiment.

Table 1. Specification of experimental system

Item		Specification
Mixer type		2-fluid jet nozzle
Mixer Size(mm)		L1,000×W800×H1,400
Slurry pump	type	Centrifugal
	Power(kW) / flow rate(m <sup>3</sup> /min)	5.5 / 0.5
	Head(m)	21
Air blower	Power(kW)	3.75kW
	Static Pressure (kPa) / flow rate (m <sup>3</sup> /min)	39.23 / 2.25

적정 노즐설계 조건 구명을 위하여 공시액은 청수(淸水)를 사용하였다. 가축분뇨가 시료마다 고형물 농도 및 점성 등이 다르나, 현재 우리나라에 많이 보급되고 있는 200톤 원형 가축분뇨액비저장조들에 고액분리한 돈분뇨 액이 주로 액비화되고 있어 함수율이 95% 이상으로 점성이 비교적 적은 경우가 많고, 가축분뇨 액비의 점성을 재현할 마땅한 방법도 없어 청수(淸水)로도 경향성만을 파악하는 데는 문제가 없다고 판단하였다. 기체는 상온의 공기를 사용 2차노즐구경별, 1차노즐 유속별, 급기량별로 시험하였다. 노즐구경별 시험은 문헌(Parkash, 1982)을 참고하여 1차노즐의 유속이 10m/s를 넘도록 설정하고 Table 2와 같이 2차노즐구경을 3수준으로 하였으며 적정 1, 2차 노즐 구경비를 구하는 시험을 하였다. 1차 노즐에서의 유속측

정은 오수펌프 토출구와 1차 노즐사이에 수도 유량계를 설치하여 측정하고 1차 노즐 단면적의 합으로 나누어 환산하였으며, 유동가시화를 위해 색리본을 사용하였고, 수중카메라를 이용하여 수중에서의 토출상태를 촬영하였다.

1차노즐 유속별 시험은 노즐 구경 조합 선발 예비시험 결과 가장 양호하였던 1차 노즐 구경 14 mm, 2차 노즐구경 28 mm 조건에서 1차 노즐 유속을 달리해 가면서 적정 1차 노즐유속을 찾기 위한 시험을 하였다. 이때 1차 노즐 유속을 조절하기 위하여 오수펌프와 유량계 사이에 바이패스 밸브를 설치하여 바이패스밸브 조절로 1차 노즐 유속을 Table 3과 같이 조절하였다.

급기량별 시험은 노즐구경 조합 1차 14 mm, 2차 28 mm로, 1차노즐의 물의 유속은

Table 2. Combination of primary and secondary nozzles

Orifice diameter		Case 1	Case 2	Case 3
Nozzle diameter	primary	14 mm	14 mm	14 mm
	secondary	14 mm	28 mm	35 mm

Table 3. Boundary conditions of factorial experiment (Nozzle(primary/secondary) : 14/28 mm)

Fluid velocity at primary nozzle exit (m/s)	8.21	11.8	12.3	14.8
Air flow rate(m <sup>3</sup> /min)	—	0.3	0.35	0.43

12.3 m/s로 고정 후 브로워의 회전수를 컨버터로 조절 기체 공급량을 4수준 (강제급기 없음, 0.30 m<sup>3</sup>/min, 0.35 m<sup>3</sup>/min, 0.43 m<sup>3</sup>/min)으로 바꾸어 가며 기포상태 변화를 관찰하였다.

## 2. 액비저장조 침전물 교반장치 고안 및 CFD를 이용한 적정 노즐 위치 설정

액비 저장조 내부에서 침전물의 퇴적을 방지하고, 효과적인 교반을 수행하기 위해서는 노즐의 배치가 중요하다. 저장조 내부의 적절한 위치에 노즐을 설치함으로써 저속영역을 최소화할 수 있으며 효율적인 교반이 가능해진다. 요인시험 결과 1, 2차 노즐 구경을 각각 14 mm, 28 mm로 하는 것이 가장 적합한 것으로 나타났으나, 가축분뇨 특성상 노즐의 구경이 작으면 막힐 우려가 있으므로 1차 노즐 직경을 20 mm로 확대하고, 동일 유량비를 유지하기 위해 2차 노즐의 직경도 40 mm로 확대하는 설계변경을 하였다. 그러나 노즐 구경이 커지면 유량은 노즐 구경 증가의 제곱에 비례하므로 큰 펌프 용량과 동력이 필요하게 되어 경제성이 낮아지게 된다. 통상적으로 노즐 배치는 요인시험 장치 (Fig. 2)와 같이 중앙에서 방사식으로 분사하는 방식과 원주를 따라 분사하는 방식 (Fig. 4)이 있으며, 전산유체역학 (Computational fluid dynamics, CFD)으로 예비분석을 수행한 결과 직경 10 m 규모의 저장조에는 중앙 방사식보다 원주를 따라 분사하는 방식이 노즐 개수를 줄이면서도 교반에 충분한 유속을 얻을 수 있는 것으로 판단되었다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 4개의 2류체 노즐을 가지는 원주형 분사방식의 액비저장조 침전물 교반장치를 고안하였다.

이러한 설계안을 바탕으로 노즐 배치간격의 최적화를 위해 CFD를 이용한 유동해석을 수행하였다. 노즐 분사구는 저장조 중심부로부터 왼쪽 하방으로 2개, 오른쪽 상방으로 2

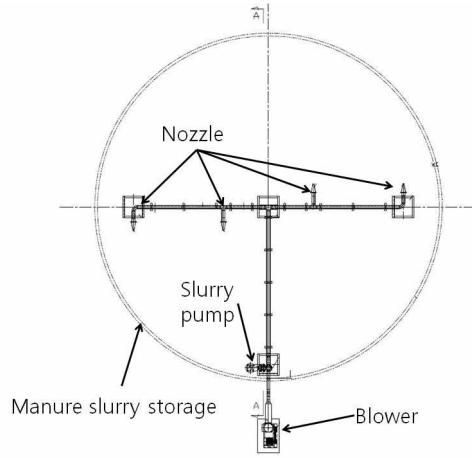


Fig. 4. The top view of prototype design.

개를 설치하여 전체 유동은 반시계 방향으로 선회하며 저장조 중심부의 바닥에는 흡입구를 두었다. 노즐 위치는 중심부에서 등간격으로 배치한 Case A의 경우는 중심부에서 반지름 방향으로 1.25 m와 3.75 m에 각각 위치하며, 회전하는 체적이 노즐당 동일하게 배치하는 Case B의 경우는 중심부에서 2.5 m와 4.0 m에 각각 위치한다. 작동유체는 물로 가정하였으며, 2차 노즐 구경은 40 mm, 오수 펌프 용량 1 m<sup>3</sup>/분로 가정하여 2차 노즐의 출구 유속을 3.31 m/s로 설정하여 CFD 해석을 수행하였다. 저장조의 지름은 10 m, 높이는 3.0 m로 하였으며 노즐의 설치 높이는 0.3 m, 노즐 고정바의 길이는 Case A는 7.5 m, Case B는 8 m로 하여 4개의 노즐을 설치한 것으

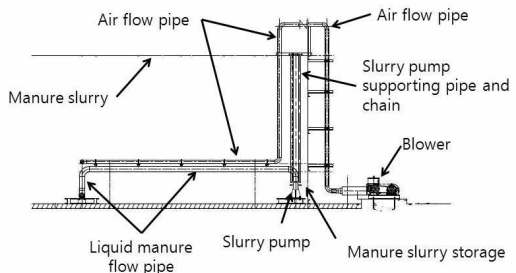


Fig. 5. Cross section view of prototype design.

로 하였다. CFD 해석에 사용한 상용코드는 FLUENT v12.1이며, 격자구성은 GAMBIT 2.3을 이용하였다. 격자는 약 45만개의 비정렬 사면체 격자를 사용하였으며 노즐과 고정바 주변 등 유동구배가 클 것으로 예상되는 지점은 격자 밀도를 증가시켰다. 유동은 정상상태 비압축성 3차원 난류로 가정하였으며, 난류모델은 Realizable k-ε 모델을 사용하였다.

### 3. 침전물 교반장치 제작 및 성능시험

#### 가. 액비저장조 침전물 교반장치 제작

액비저장조의 침전물 교반장치에 사용되는 2류체 노즐은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 노즐 상부에 공기 공급구를 설치하여 블로워에서 공급되는 고압공기가 1차 노즐과 2차 노즐 사이로 공급되도록 하였다. 노즐의 하부

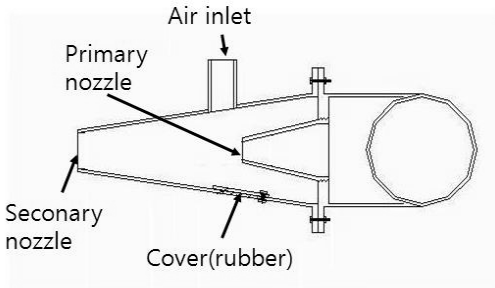


Fig. 6. Cross section of nozzle.

에는 직경 25 mm의 구멍과 그 구멍을 노즐 안쪽에서 덮는 배플을 Fig. 6과 같이 설치하였다. 이 배플에 의하여 고압의 기체를 공급하지 않고 고압액체만 공급할 때는 베르누이 원리에 따라 1차 노즐 하류에 음압이 형성되어 배플이 개방되어 액체 제트노즐이 되고, 고압의 기체를 공급 할 때에는 배플이 닫혀서 1차 노즐에서 나오는 고압액체와 고압기체가 섞여서 2류체 노즐의 역할을 하도록 하였다. 또한 난류속에서 기체방울이 액체와 기체의 점성계수 차이와 속도차이에 따른 마찰력으로 기포가 미세화되어 2차 노즐로 분출되도록 하였다. 노즐의 배치는 Fig. 5와 같이 저장조의 중앙에 설치된 일자형 액체공급 파이프에 앞 절의 Case 1과 같이 등 간격이 되도록 왼쪽과 오른쪽에 2개씩 반대방향으로 설치하였다. Fig. 7은 200 ton 규모의 액비저장조에 설치한 것을 나타내고 있으며, 여기에 설치한 오수펌프는 수중펌프로 토출량 1 m<sup>3</sup>/min, 소비전력 5.5 kW 용량으로 저장조의 안쪽 측면에 설치하였으며, 브로워는 3.7 kW 용량의 루츠 송풍기를 설치하였다.

#### 나. 액비저장조에서의 침전물 교반 성능시험

공시기인 침전물 교반장치를 지름 10m, 높이 3m의 저장조에 돈분뇨가 2.5m 높이로 채워져 있는 액비저장조에 설치하여 시험하

Table 4. Specification of the prototype of jet mixer and slurry tank

Nozzle Type/ No. of Nozzle	2-fluid nozzle/ 4
Fluid/Air pipe Material	Zinc galvanizing, Stainless steel /PVC
Nozzle Diameter	Primary 20 mm, Secondary 40 mm
Distance between nozzles	2.5 m
Slurry pump	Centrifugal type Capacity 1 m <sup>3</sup> /min, Power electric motor (5.5 kW)
Blower	Roots blower (3.7 kW)
Manure Tank	Diameter 10 m × 3 m, Material Plastic

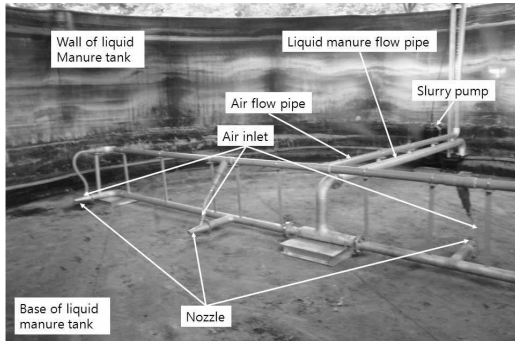


Fig. 7. Photo of prototype Jet mixer installed in slurry tank.

였으며, 공시재료인 가축분뇨액비는 고액분리를 한 액으로 평균 TS (Total Solid)는 23.4 g/L, VS (Volatile Solid)는 15.5 g/L이었다.

시험방법은 처리별 시험 후 24시간 작동을 멈추어 유동이 안정된 후 다음시험을 실시하였다. 교반성능을 측정하기 위해 시료채취 시간은 침전물 교반기 가동전과 오수펌프 가

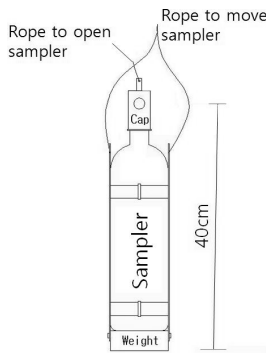


Fig. 8. Sampler.

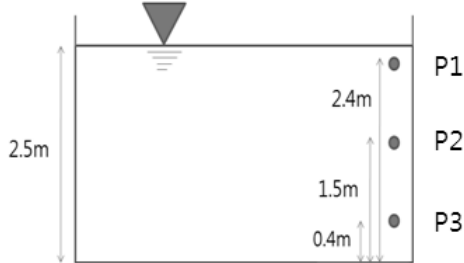


Fig. 9. Sampling point in liquid manure tank.

동 (15 min, 30 min, 45 min), 오수펌프와 브로워 가동 (15 min) 조건, 공시기의 작동을 정지한 후 고형물의 침전 속도를 알아보기 위하여 정지 1시간 및 2시간 후의 상태를 측정하였다.

침전물 부유 및 혼합정도 측정은 Fig. 8과 같이 액체시료 채취병을 이용하여 Fig. 9에 표시된 바와 같이 바닥에서 2.4 m (P1), 1.5 m (P2), 0.4 m (P3) 높이의 액비 샘플을 채취하였으며, 분석은 건조오븐에서 105℃ 건조와 600℃소각으로 TS (Total Solid)와 VS (Volatile Solid)를 분석하였다.

## 결과 및 고찰

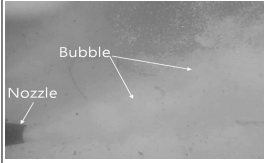
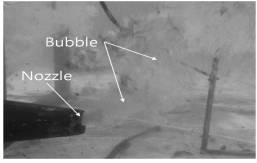
### 1. 적정노즐 설계조건 구명시험

적정 노즐 설계조건 구명을 위하여 1, 2차 노즐 구경을 조합하여 시험한 결과는 Table 5와 같다.

1차 및 2차 노즐의 구경을 각각 14 mm로 하고 1차 노즐에서 유속을 13.3 m/s로 하였을 때는 수압에 의하여 물이 브로워로 역류하여 시험장치 안전상 시험을 할 수 없었다. 1차 노즐의 구경을 14 mm, 2차 노즐의 구경을 28 mm로 하고 1차 노즐의 유속을 13.3 m/s로 하였을 때에는 공기가 미세화 되어 Table 5의 노즐 분사장면 Case 2와 같이 물과 함께 포물선을 그리며 확산되면서 상승하였다. 공기 방울의 크기는 정확히는 측정할 수 없었으나 토출 직후의 작은 공기방울이 전진함에 따라서 결합되어 수면에 도달 할 때는 직경 3mm 전후의 기포가 많이 보였다 (Fig. 10).

1차 노즐의 구경을 14 mm로 고정하고 2차 노즐의 구경을 35 mm로 확대한 결과 공기의 공급이 적을 때는 미세화 되지만 공기의 공급이 많아지면 일부 공기는 큰 기포를 만들어 Table 5의 노즐 분사장면 Case 3과 Fig. 11과 같이 수직상승하는 경향이 있었다. 그

Table 5. Factorial test result for selecting the proper orifice size of the nozzles

Nozzle (primary/secondary)		Case 1 (14 mm / 14 mm)	Case 2 ( 14 mm / 28 mm)	Case 3 (14 mm / 35 mm)
Fluid speed at the orifice of primary nozzle(m/s)		13.3	13.3	13.3
Air bubble	Droplet size	—	Small (less than 3 mm)	Some large some small
	Spread	—	Spread to more than 1 m	Spread to more than 1 m
Result		Air bubbles don't become droplets.	Air bubbles become droplets	Air bubbles become droplets partially
Remarks		Failure : Watter back up to blower		

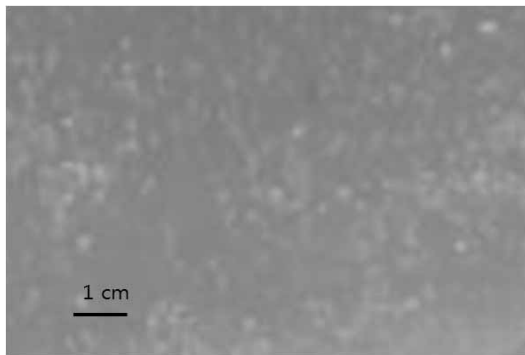


Fig. 10. Small droplets in case 3.

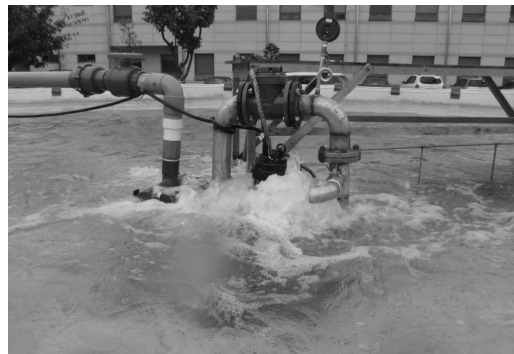


Fig. 11. Large bubbles in case 4.

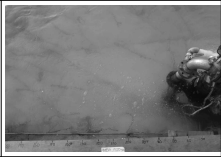


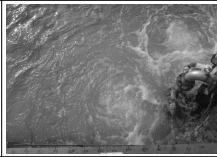
러므로 원활한 기체의 미세화를 위해서는 1차 노즐직경과 2차 노즐직경의 비는 1:2를 유지하는 것이 원활할 것으로 판단되었다. 또한, 노즐 구경 조합시험 결과를 토대로 선발된 1차 노즐 구경 14 mm, 2차 노즐 구경 28 mm로 고정하고 오수펌프와 1차 노즐 사이에 바이패스밸브를 설치, 개폐량을 조절하여 1차 노즐에서 유속을 8.21 m/s, 11.8 m/s, 12.3 m/s, 14.8 m/s로 달리하며 공기방울의 미세화상태를 측정한 결과 1차 노즐 유속이 11.8 m/s에서 일부 미세화 되기 시작하여

12.3 m/s 이상에서는 전부 미세화 되는 것으로 나타났다.

한편, Table 6에서는 1차 노즐 구경 14 mm, 2차 노즐 구경 28 mm로 하고, 1차 노즐의 액체 유속을 12.3 m/s 고정한 후 기체 공급량에 따른 미세화 상태를 나타내었는데, 공기 공급량이 많아지면 부력이 증가하여 일찍 상승하므로 도달거리가 약간 짧아지는 것 외에는 큰 차이가 없었다. 따라서 공기방울의 미세화를 위해 1차 노즐과 2차 노즐의 구경비를 1:2로 한 상태에서 1차 노즐의 유속을 12.3



Table 6. Test result of injection distance of 2-fluid nozzle by various air flows

Air flow (m <sup>3</sup> /min.)	No air flow	0.30	0.35	0.43
Air bubbles	a little	much	much	much
Photo				
Remarks	a little bubbles made by venturi effect			

m/s 이상으로 하여야 할 것으로 판단되었다.

또한 2류체 노즐을 사용하여 교반할 경우 1차 노즐과 2차 노즐사이에서 물과 공기가 섞이는 효과가 있어, 섞여진 물과 공기방울의 2상(액상-기상)의 혼합상태의 유체가 부력에 의하여 떠오르는 경향이 있다. 따라서 수평으로 설치된 노즐 전방의 유속을 측정한 결과 노즐 바로 앞과 아주 가까운 거리에서는 속도가 측정되나 1 m 보다 떨어진 곳에서는 흐름이 측정되지 않았다.(Table 7) 이 경우 강제로 공기를 공급하지 않는 경우도 벤츄리 효과에 의하여 공기방울이 Fig. 12와 같이 적은 양이지만 생기는 경향이 있으므로 강제 공기를 공급 때 보다는 약하지만 마찬가지로 부력에 의해 상승하는 흐름이 발생하여 비슷한 효과가 나타났다. 그러므로 노즐 전방의 먼 곳의 유속을 확보하여 노즐이 설치된 바닥면에서의 침전물을 부유시키기 위하여 노즐의 1차노즐과 2차노즐 사이에 음압이 걸리면 배플이 열려 액체가 빨려 들어가

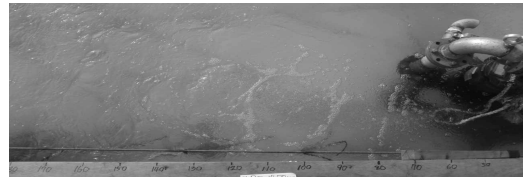


Fig. 12. Photo of small bubbles in the fluid without air supply.

액체 제트노즐로 사용할 수 있도록 Fig. 6과 같이 시작기에 적용하였다.

## 2. CFD 이용 유동해석에 의한 노즐 분사구 위치 설정

노즐 위치를 중심부에서 등간격으로 배치한 Case A와 회전하는 유체 체적이 노즐당 동일하게 배치한 Case B에 대한 CFD 해석 결과를 0.3 m 높이의 평면에서의 유속분포로 Fig. 13에 나타내었다. 노즐이 중심에서 반지름 방향으로 각각 1.25 m와 3.75 m에 위치하

Table 7. Injection speed by distance from the nozzle

	Distance from nozzle at same height				
	0 m	1 m	2 m	3 m	4 m
2-phase nozzle	2.39	0.062	0	0	0
liquid jet nozzle	2.43	0.584	0.263	0.112	0.089

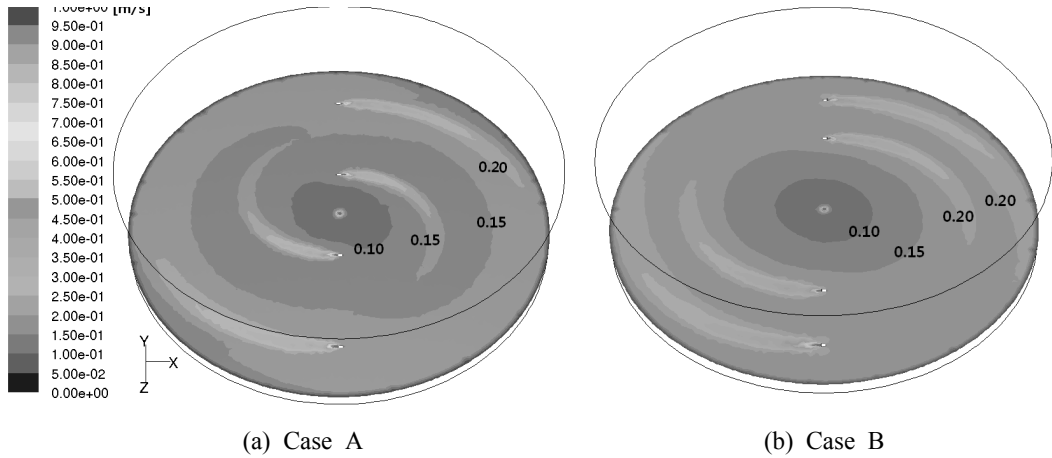


Fig. 13. Comparison of fluid velocity distribution at the plane of 0.3 m height.

는 Case A의 경우가 노즐이 각각 2.5 m와 4.0 m에 위치하는 Case B에 비해 유속이 빠른 영역이 상대적으로 넓게 분포하며, Case B는 벽면 근처의 외부유동은 Case A에 비해 상대적으로 고속이나 중심영역의 유속이 낮게 나타났다. 보다 정량적 유속 평가를 위해 Fig. 14에는 노즐 고정바와 90도 각도의 방향에 대해 높이 0.5 m와 1.0 m 높이에서의 유속 분포를 나타내었다. 0.5 m 높이에서 유속은 중심부에서 약 1.5 m까지는 Case A와 B 모두 비슷하나 Case A는 그 이후 유속이 급속히 증가하여 약 2.0 m 거리에서 약 0.22 m/s로 Case B에 비해 약 0.08 m/s 높은 값을 나

타내는 반면, Case B는 약 3.3 m 거리에서 유사한 속도의 피크값을 나타낸다. 정도는 약 해지나 이러한 경향성은 1.0 m 높이에서도 유사하게 나타나며 Case A는 중심부의 고속 영역이 상대적으로 넓은 반면 Case B는 가장 자리에서의 유속이 높게 나타났다. 모든 Case들에서 중심부는 동일한 유량으로 흡입하는 흡입구가 존재하므로 유속은 거의 같게 나타났다. 이상의 CFD 해석 결과를 바탕으로 실제 저장조에서 침전물의 효율적 부유와 혼합을 위해서는 중심부에서 유속이 빠른 영역이 상대적으로 넓으며, 중심부와 가장자리 영역의 속도편차가 작은 Case A가 유리한 것으로 판단되어 침전물 교반 장치의 제작에 반영하였다.

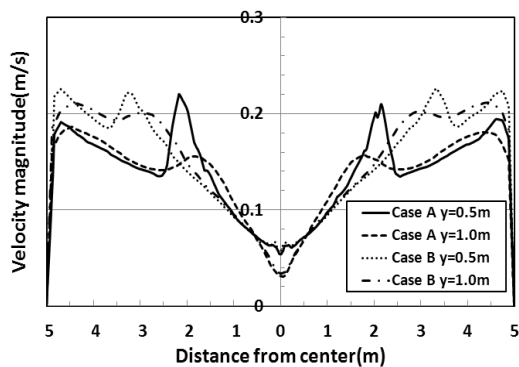


Fig. 14. Fluid velocity distribution in case nozzles were installed at same length distance.

### 3. 가축분뇨 액비저장조 침전물교반장치 성능시험

시료 채취병의 특성상 바닥에서 40 cm 이내의 시료는 채취가 불가능하여 바닥 침전물의 성분은 측정하지 못하였다. 고압기체를 공급하지 않고 액체만 분사하여 액체제트노즐 분사로 교반하였을 경우 가동후 TS는 Fig. 15와 같이 가동 전 평균 21.1 g/L로 낮았

으나 가동 15분후 23.4 g/L, 30분후 23.0 g/L, 45분후 23.5 g/L 증가하였다. VS는 Fig. 16과 같이 가동 전 13.3 g/L에서 시간이 경과에 따라 14.4 g/L, 14.1 g/L, 15.5 g/L로 증가하였다. 앞서 기술한 바와 같이 측정된 전체 평균 TS와 VS가 각각 23.4 g/L, 15.5 g/L임을 감안한다면 교반기를 가동하지 않는 경우는 많은 고형물이 바닥에 가라앉아 있음을 알 수 있다. 또한, 가동 후 45분이 경과한 후에는 TS와 VS 모두 전체 평균과 동일한 값을 나타내고 있어 침전물들이 충분히 부유되어 혼합됨을 확인할 수 있었다. 측정위치 높이별로는 TS와 VS가 상층에서 높게 나타났는데 이는 스킴의 영향으로 추정된다.

교반방식별 TS 및 VS의 차이를 분석한 결과 Fig. 17, 18에서 보는 바와 같이 교반기 무가동 시에는 저장조 바닥에서 높이 2.4 m 인 상층부인 P1, 1.5 m 높이인 중간층 높이인

P2, 0.4 m 높이인 아래층인 P3 등 세 처리 모두 낮았으나, 액체 제트분사 가동 시에는 고르게 높아지는 결과가 나타났다. 이는 무가동시에 아래 바닥에 깔려 있던 고형물과 유기물들이 교반에 의하여 저장조 내에서 고르게 혼합된 결과로 판단된다(Fig. 19). 액체-기체 2류체 노즐 가동 시에는 Fig. 20과 같이 상층 표면에 상당한 양의 거품이 형성되었는데 이는 바닥 가까이 설치되어 있는 노즐 분사구에서 작은 기포방울이 발생하여 상승했기 때문이다. 이 기포방울은 저장조 내의 가축분뇨 중의 작은 고형물들을 상층으로 끌어올리는 기능을 하므로 액체-기체 2류체 노즐 가동시에 TS와 VS를 보면 Fig. 17, 18과 같이 가장 낮은 위치에 있는 P3에서 감소하고 P2에서 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. P1이 P2 보다 적게 나온 것은 가축분뇨 위의 거품 안에 적지 않은 고형분과 유기물

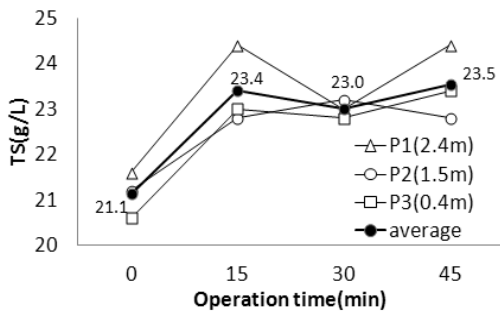


Fig. 15. The average TS of jet mixed slurry.

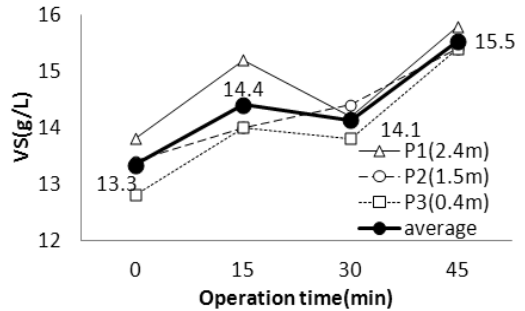


Fig. 16. The average VS of jet mixed slurry.

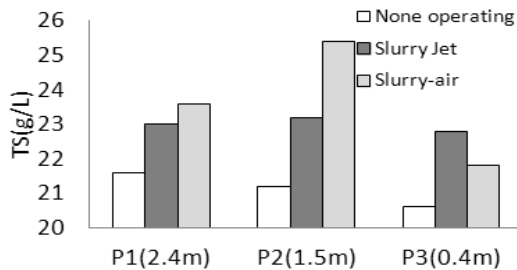


Fig. 17. The TS of mixed slurry at sampling positions.

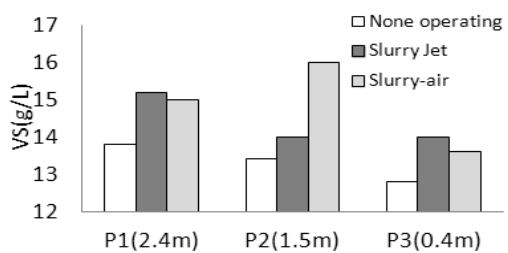


Fig. 18. The VS of mixed slurry at sampling positions.



Fig. 19. Slurry mixing without air supply.



Fig. 20. Slurry mixing with air supply.

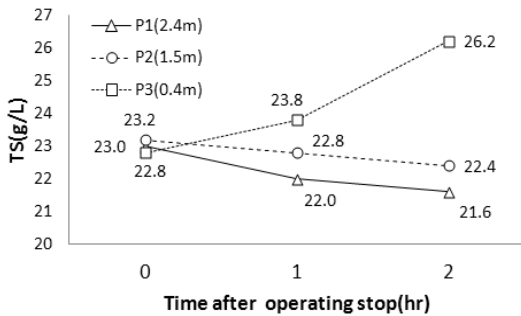


Fig. 21. Measured TS after slurry mixing.

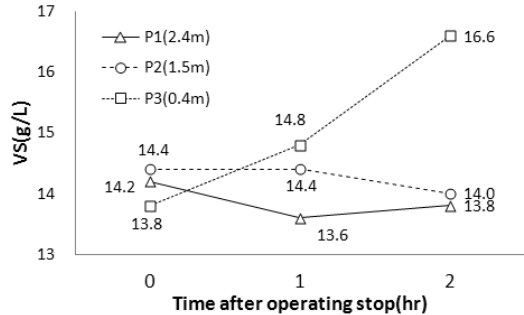


Fig. 22. Measured VS after slurry mixing.

이 집적되어 가고 있기 때문일 것으로 추정된다.

침전물 교반장치를 연속 가동하는 경우 에너지 소비량이 많아져 간헐 가동을 하는 경우가 많다. 이 경우 가동 중지시간이 길어지면 고형분이 바닥에 침전, 고정되어 처리가 곤란하게 될 수 있다. 이런 이유로 교반 중에 부유하고 있는 고형물들이 바닥까지 가라앉는데 소요되는 시간을 분석하는 것은 장치의 에너지 소비효율 측면에서 중요하다. 이를 위해 장치의 가동을 중지한 후 TS와 VS의 농도변화를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 21, 22에 각각 나타내었다. 바닥에서 0.4 m 높이인 P3점의 농도가 계속 증가하는 것으로 보아 대부분의 고형물이 정지 후 2시간 후에도 바닥까지 가라앉지는 않은 것으로 판단된다. 따라서 2.5 m 높이로 가축분뇨액비를 채우고 잘 교반된 가축분뇨저장조의 경우 고형

물이 2 m 가라앉는 데에 약 2시간 정도가 소요되는 것으로 판단된다. 따라서 2.5 m 높이로 가축분뇨액을 저장한 저장조에서 2시간씩 가동을 정지하여도 침전물이 바닥에 쌓일 가능성은 낮을 것으로 판단되었다.

### 적 요

본 연구에서 고형침전물이 누적되어 쌓이는 것을 효과적으로 부유시키고 혼합하여 미세한 공기방울이 액비에 접촉함으로써 발효촉진을 도모하고자 폭기식 2류체 제트노즐 설계조건 구명시험을 실시하여 1차 노즐과 2차 노즐 구경비 설정 및 1차 노즐에서의 액체의 적정 유속을 설정하고, CFD 이용 유동 해석에 의한 노즐 분사구 위치를 설정하였다. 이 결과를 토대로 가축분뇨 액비저장조 침전물 교반장치를 제작하여 농가에 많이 보

급되고 있는 200 ton 규모의 액비저장조에 설치하여 침전물 교반 성능을 평가한 결과는 다음과 같다.

1. 침전물 교반기의 설계조건 구명을 위해 2류체 노즐을 공시하여 시험한 결과 1차 노즐과 2차 노즐의 구경비를 1:2로 한 상태에서 1차 노즐의 유속을 12.3 m/s 이상으로 하여야 기체 기포의 미세화가 가능한 것으로 판단되었다.

2. 컴퓨터유동해석을 한 결과 노즐의 설치 간격을 같게 하는 것이 노즐당 담당부피를 같게 설치하는 것보다 효율적인 것으로 분석되었다.

3. 설계요인 시험과 유동해석을 토대로 4개의 노즐이 일자형 관에 설치된 침전물교반장치를 제작 200톤 저장조에 설치 가동시험을 실시하였다. 먼저, 전체 평균 TS와 VS가 각각 23.4 g/L, 15.5 g/L인데 반하여, 교반 전 40 cm 이상 높이의 TS 및 VS가 평균 21.1 g/L, 13.3 g/L으로 교반기를 가동하지 않는 경우는 많은 고형물이 바닥에 가라앉아 있음을 알 수 있다. 또한, 가동 후 45분이 경과한 후에는 TS와 VS 모두 전체 평균과 동일한 값을 나타내고 있어 침전물들이 충분히 부유되어 혼합됨을 확인할 수 있다. 액체제트 분사 교반 45 분후에 평균 23.5 g/L, 15.5 g/L로, 액체-기체 2류체 노즐 사용시 23.6 g/L, 14.9 g/L로 증가한 것은 교반 전에 바닥에 침전되어 있던 고형물들을 부유시켜 교반 혼합하는 것이 가능한 것으로 판단되었으며, 호기발효를 고려하지 않은 균일도 측면에서는 액체제트를 사용한 것이 보다 균일한 것으로 나타났다.

4. 침전물 교반기의 가동주기를 알아보기 위해 가축분뇨의 교반을 중지하였을 때 2시간 후에도 0.4 m 높이에서 TS 및 VS가 증가하고 있어 교반정지 간격을 2시간으로 주어

도 교반기 운영에는 큰 지장이 없을 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 농촌진흥청 농업과학기술 연구개발사업(과제번호 PJ007206)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## 인 용 문 헌

1. Burton, C. H. and Turner, C. 2003. Manure management treatment strategies for sustainable agriculture 2nd editon. Silsoe Research Institute, p. 230-237, p292-294.
2. Prakash R. bathija, 1982, Jet Mixing Design and Applications, Chemical Engineering, Decemer 13.1982.
3. 佐藤純一. 1993. 曝氣裝置, 畜産環境對策大事典, 農文協, p.267-270.
4. 김두환. 2010. 유체유동형 고효율 생물반응조에 의한 음식물침출수의 바이오가스 발생특성 연구, 박사학위논문, 서울시립대학교 대학원.
5. 농촌진흥청. 2002. 가축분뇨 처리를 위한 Biogas 이용기술 개발, 2002 농촌진흥청.
6. 농촌진흥청. 2010. 가축분뇨분석실험 핵심정리, 2010 농촌진흥청.
7. 오권영, 최광재, 유병기, 이성현, 최동현. 2003. 가축분뇨액비 교반폭기장치 개발. 농촌진흥청 2003 농업공학시험연구보고서, p290-296.
8. 이국희, 김종수. 1999. 혐기성 생물반응기에 의한 축산폐수의 처리, 한국환경농학회, 18(1):54-58.
9. 정찬희, 이계복, 2009 이상 제트 노즐을

- 사용한 순산소 폭기시스템의 이상유동 특성, 에너지공학, 18(4):258-263.
10. 최광근, 신종철, 전현희, 김상용, 이진원. 2003. 혐기소화조에서 메탄 발생에 영향을 미치는 인자 분석, 한국생물공학회지 18(6):473-478.
  11. 최광재, 오권영, 노진상, 유병기, 정광화. 2006. 가축분뇨 액비저장조 침전고형물 제거장치 개발, 농촌진흥청 2006 농업공학 시험연구보고서, p299-312.
  12. 허남효. 2005. 유기성폐기물의 바이오가스화 기술 및 현황, 한국태양에너지학회지 4(1):9-25.