

부식과 악취가스 대기확산 방지를 위한 액비저장조 밀폐형 지붕모델 개발

윤남규 · 이성현 · 김경원 · 염성현
농촌진흥청 농업공학연구소 시설자원공학과

Development of a Closed Roof Model for Liquid Manure Storage Tanks to Prevent Corrosion and Atmospheric Diffusion of Oder Gases

Yun, N. K., Lee, S. H., Kim, K. W. and Yum, S. H.

Agricultural Facilities and Resources Engineering Division, National Institute of Agricultural
Engineering, Rural Development Administration

Summary

The roof structural model of liquid manure storage tank was designed to improve a structural safety and an ability of resistance to corrosion by the bad environmental condition with high humidity and high gas concentration.

Due to corrosion of a general steel, the 5 years used materials were reduced to one-third of a new material in the result of a bending strength test. Some structural materials were tested to evaluate a strength and an anti-corrosion, and stainless steel pipe (STS439), steel angle with zinc hot dipping, rectangular steel pipe covered with FRP (Fiberglass Reinforced Plastics) resin were selected finally. A stainless steel is more expansive about 3~5 times than general structural steel. But its durability under heavy corrosive environment is expected twice as long as general steel. The roof models were designed as closed cone type for each of the three structural materials.

In the result of a FEM (Finite Element Method) structural analysis for the developed models, the safe snow depth was higher 2.3 times than a general roof structure, when elements of equal section modulus were used.

(Key words : Roof structure, Liquid manure storage tank, Structural safety, Steel corrosion)

서 론

1999년 정부의 축산분뇨자원화 정책의 일환으로 액비저장조의 시범 설치가 시작된 이

래로 매년 600여기의 액비저장조 설치를 지원하여 2005년말 현재 3,400여기의 액비저장조가 전국에 설치되었고, 2013년까지 매년 600여기의 액비저장조를 추가로 설치지원할

Corresponding author : Yun, N. K., Agricultural Facilities and Resources Engineering Division, National Institute of Agricultural Engineering, RDA, Suwon, 441-857, Korea.
Tel : 031-290-1878, E-mail : ecas21@rda.go.kr

예정이다(윤 등, 2006). 액비저장조는 가축의 배설물인 슬러리를 탱크에 저장하는 동안 폭기장치를 이용해 발효·부숙을 진행시켜 양질의 액비를 생산하여 농지에 환원하고자 하는 목적으로 설치되었다. 그러나 폭기과정에서 발생하는 악취로 인한 민원의 발생과 생산된 액비의 품질 및 안전성 등에 대한 기준의 부재로 인해 본래의 역할을 다하지 못하고 있는 실정이다(이 등, 2006). 또한, 액비저장조 지붕구조물의 부식이 심각하여 설치후 3년 이상 경과한 시설에서는 표면이 완전부식되어 구조물의 안전성까지 위협하는 실정에 처해 있다. 이와 같은 사정으로 인하여 현재 전국에 설치된 액비저장조의 상당수가 폭기를 하지 못함으로 인해 탱크 바닥에 슬러리가 퇴적되어 저장용량이 감소되거나 아예 방치되어 있는 경우도 있는 실정이다(윤 등, 2006; 이 등, 2004). 또, 이 등(2005)은 우드칩을 이용한 액비저장조의 악취탈취장치를 개발하여 암모니아가스의 대기확산을 방지하는 기술을 개발하였는데, 이때 악취가스의 포집과 대기 중으로의 누출을 막기 위해 밀폐형 지붕구조를 사용하여 실험하였다.

액비저장조 지붕구조재의 대부분인 철재는 다습조건에서 암모니아가스의 영향으로 부식이 촉진된다. 일본 아연도금강구조물연구회의 기술자료(1998)에 의하면 아연도금의 부식속도는 토양속에서 $16.3 \sim 33.0 \text{ g/m}^2/\text{년}$, 대기중에서 $7.8 \sim 10.9 \text{ g/m}^2/\text{년}$ 으로 보고하고 있다. 한국산업표준규격(KS)에서 비닐하우스용 아연도 강판의 아연도금부착량은 138 g/m^2 이상으로 규정하고 있으므로 아연도금 피막의 내용년수는 토양속에서 4.2~8.5년, 대기중에서 12.7~17.7년으로 추정할 수 있다. 또, Wranglen(1972)는 방식처리를 하지 않은 강 부식속도를 습윤환경하에서 $5 \sim 100 \mu\text{m}/\text{년}$ 으로 보고하고 있다(남, 2001). 그러나 암모니아가스의 작용으로 인해 부식이 촉진되는 축산시설에서의 부식속도는 위의 값보다도 훨씬 더

클 것으로 예상되며, 특히 용접에 의한 부재의 연결부위는 아연도금이 없어 가장 먼저 부식이 진행되는 부위이므로 용접부위의 연결강도저하는 더욱 심각한 문제를 야기할 것으로 예상된다. 실례로 2005년말 호남지역 폭설에 의해 액비저장조 지붕구조물의 붕괴 피해가 다수 발생하였으며, 현장조사 결과 이들 구조물의 부식정도는 심각한 수준으로 조사되었다(윤 등, 2006).

따라서, 본 연구는 재료의 내식성을 개선하고, 악취가스의 대기확산을 방지하기 위한 밀폐형 구조의 액비저장조 지붕 모델을 개발하고자 수행되었다.

재료 및 방법

1. 액비저장조 지붕구조의 사용실태 조사

액비저장조의 사용실태 및 부식정도를 조사하기 위해 2006년 4월에 강원도 철원군, 충남 서산시, 전북 익산시 등 3개 지역의 액비저장조를 각각 10기씩 총 30기를 조사하였다. 조사항목으로는 지붕구조형식 및 액비저장조 용량, 구조재의 종류 및 규격, 설치년도, 부재연결방법, 부식상태, 폭기장치 가동 여부 등이 포함되었다. Fig. 1은 국내에 설치된 원형 액비저장조의 대표적인 지붕구조 형태를 나타낸 것으로 모두 외부 공기가 자유롭게 유통되는 개방형 구조들이다.

2. 내부 환경조사

밀폐형 액비저장조 내부의 환경조사를 위해 온도센서 TMC-HC (HOBO, USA)를 이용하여 액비저장조 상부기온, 외부기온, 액비온도를 10분 간격으로 연속 측정하여, 데이터 로거 H08-008-04 (HOBO, USA)를 이용하여 데이터를 수집하였다. 또, 외부 상대습도를 같은 간격으로 데이터로거 H08-007-02 (HOBO,

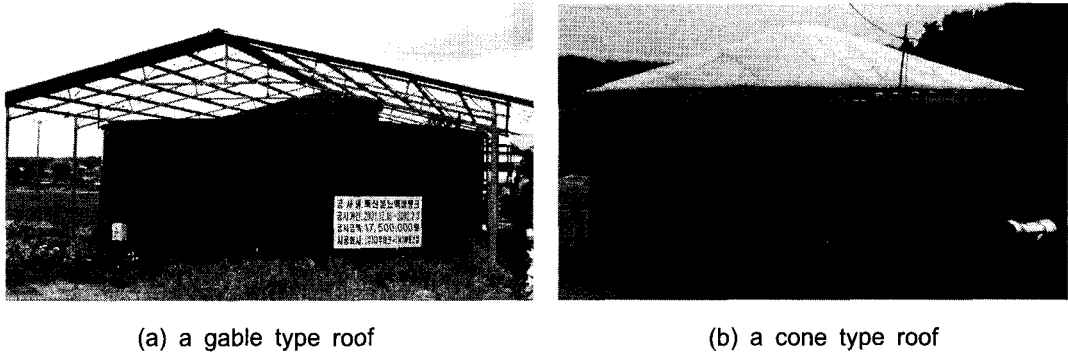


Fig. 1. Roof types of a liquid manure storage tank.

USA)를 이용하여 연속 측정하였다. 액비저장조 상부의 상대습도는 가스와 분진으로 인한 센서의 오염 등의 이유로 연속 측정이 곤란하여 가스농도 측정과 함께 7~10일 간격으로 측정하였다. 상대습도 센서는 S-THA-M006 (HOBO, USA)를 사용하였고, 가스측정센서는 PAC III(Dräger, Germany)를 사용하여 암모니아와 이산화황 가스의 농도를 측정하였다. 가스농도 및 환경측정은 경기도 안성시 죽산면에 위치한 양돈농가에 설치된 밀폐형 지붕을 가진 액비저장조(400톤)에서 2006년 4월부터 2006년 10월까지 수행하였다.

3. 재료의 강도시험

지붕구조용 재료의 휨강도 시험을 위해 농업공학연구소의 만능강도시험기(PYMU-30TC)를 이용하여 재료의 굽힘시험을 수행하였다. 시험재료는 일반구조용 강관(SS41, $\varnothing 27.2-1.6t$)과 스테인리스 각관(STS304 30×30-1.5t, STS439 33×20-1.5t) 등의 미사용 자재 3종류와 설치현장에서 채취한 사용년수 5년의 일반구조용 강관(SS41 $\varnothing 34-1.8t$)을 사용하였다. 굽힘시험시 지간은 60cm, 재하속도는 3 mm/min으로 모든 시험에서 동일하게 하였고, 시험이 진행되는 동안 실시간으로 재하하중과 변위가 컴퓨터에 의해 기록 및 저장되도록 하였다.

4. 구조설계 및 구조안전성 분석

우리나라의 농림부, 건설교통부, 환경부, 축협중앙회 등에 의해 제정 고시된 축산분뇨 자원화시설 표준설계도(농림부 등, 1999)에 의하면 액비저장탱크는 표준설계에 포함되어 있으나, 지붕구조는 표준설계에 제외되어 있다. 그러나 실제 현장에 설치된 액비저장탱크는 같은 용량이라도 시공회사에 따라서 그 직경과 높이가 차이가 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 표준설계에 포함된 액비저장탱크 중 현재 농가에서 가장 일반적으로 설치하고 있는 200톤 용량의 원형법랑판넬 액비저장조를 기준으로 하여 지붕구조모델을 설계하였다.

지붕구조는 악취가스의 대기확산을 방지하기 위하여 밀폐형으로 설계하고, 피복자재는 액비의 발효를 촉진하기 위해 광투과성이 있는 백색 천막지를 사용하도록 설계하였다. 지붕골조 자재는 내식성과 강도, 경제성을 종합적으로 고려하여 설계하였다. 설계된 구조물은 FEM 구조해석프로그램인 SAP2000(CSI Co., USA)을 이용하여 구조안전성을 분석하였다. 구조안전성 분석시 밀폐형 액비저장조 지붕구조물의 열악한 부식환경을 고려하여 일반 대기조건에서의 분석 조건보다 높은 안전율을 적용하였다.

결과 및 고찰

1. 액비저장조 지붕구조의 사용실태

액비저장조 지붕구조의 사용실태 및 부식 상황 조사를 수행한 결과(Table 1), 양지붕형이 63%로 37%인 원추형 보다 더 많은 것으로 조사되었는데 이것은 조사대상 지역 중 강원도 철원군의 경우 2005년부터 지자체 사업으로 당초 설치되어 있던 원추형 지붕을 철거하고 양지붕형으로 지붕을 교체한 것이 많았기 때문이었다. 그러나 양지붕형의 경우 액비저장조 폭기시 악취의 대기확산에 대한 대책이 전무한 형태이므로 악취방지법의 실시로 악취민원이 많이 증가하고 있는 현재의 추세를 볼 때 보급 확대에는 문제가 있을 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 지붕구조의 형태를 밀폐가 용이한 원추형 형태를 기본으로 설정하였다.

폭기장치의 가동여부 조사결과 수시로 연중 폭기를 수행하는 농가는 전체의 3%에 불과하였고, 대부분 농경지에 살포하기 직전 1개월 동안만 폭기장치를 가동하거나 아예 폭기장치를 가동하지 못하고, 슬러지의 바닥퇴적이 심각한 경우도 있었다. 폭기장치를 연중 가동하지 않는 이유로는 가동시의 악취발생이 대부분을 차지하였고, 일부 농가에서는 액비를 살포할 농경지를 확보하지 못하였기 때문인 경우도 있었다.

또한, 지붕 설치 후 3년 이상이 경과한 시설에서는 전면부식이 관찰되었고, 3년 미만의 시설에서도 용접부위, 파이프 접합부위 등에서 붉은 녹이 만연한 부식이 관찰되었다. 이러한 결과는 일본 아연도금강구조물연구회의 기술자료(1998)에 제시된 아연도금의 최대부식속도인 토양중에서의 4.2년보다도 2배 이상 빠른 속도로 부식이 진행되었음을 시사하는 것이어서 액비저장조 구조물의 부

Table 1. Survey results on the actual condition for liquid manure storage tanks and its roofs

Classification		Quantity	Rate(%)
Roof Type	gable type	19	63
	cone type	11	37
Use	livestock farming	16	53
	field farming	14	47
Using Period (years)	> 6	2	7
	4~6	9	30
	2~3	7	23
	≤ 1	12	40
Aeration	no use	29	97
	use	1	3
Storage Capacity (ton)	≤ 400	27	90
	> 400	3	10
Corrosion Status	no corrosion	2	7
	plating corrosion	5	17
	partial corrosion	17	57
	severe corrosion	6	20

식에 대한 대책이 중요함을 알 수 있었다. 액비저장조 지붕구조물의 구조재료는 조사된 시설 모두 일반구조용 강관 혹은 각관을 사용하였고, 양지붕형의 경우는 각관을 트러스로 용접하여 설치하였고, 원추형의 경우는 원형 강관을 트러스 혹은 경사보로 용접 연결하여 설치되었다. 아연도금 파이프를 구조용 재료로 사용할 때 부식이 가장 심각한 부위는 용접부위로 나타났고, 원형관이나 각관을 제조시 길이방향의 접합부 또한 가장 먼저 부식이 진행되는 부위로 나타났다. 아연도금이 되어 있는 일반 표면의 경우는 표면의 아연도금이 부식되는 기간 만큼의 부식지연 효과가 있어 상대적으로 부식이 늦게 진행되는 것으로 나타났다.

2. 액비저장조 밀폐형 지붕의 내부 환경

밀폐형 액비저장조 지붕구조 내부의 온습도는 Fig. 2와 같이 온도는 실외기온보다 10℃ 정도 높은 35~40℃를 유지하는 고온조건이고, 노점온도는 25℃ 정도로 야간 시간대에 쉽게 내부 공기가 포화될 것임을 예측할 수 있었다. 이러한 내부공기의 수분포화 및 응결은 액비저장조 지붕내 구조재인 금속재료의 표면에 지속적인 결로현상을 초래하고, 그 결로수는 Fig. 3의 결과와 같이 높은 암모니아 가스 농도 조건과 결합하여 화학적으로 산성인 암모니아수가 되어 금속재료의 부식을 더욱 가속시킬 것으로 판단되었다. Fig. 3에서 황화수소와 암모니아 가스의 농도변화는 계절에 따른 차이라기보다는 분뇨의 유입시기와 폭기장치의 가동여부에 따라 변화를 나타냈다. 특히 암모니아 가스는 새로운 분뇨를 투입한 직후부터 일정 수준으로 발효가 진행될 때까지의 시기에 급격한 농도의 증가를 나타내었다. 그리고, 일반적으로 혐기성 발효시 많이 발생하는 황화수소는 폭기장치를 가동하기 시작한 시점을 기준으로 상대적

으로 농도가 낮은 수준에서 안정화되는 경향을 나타내었다.

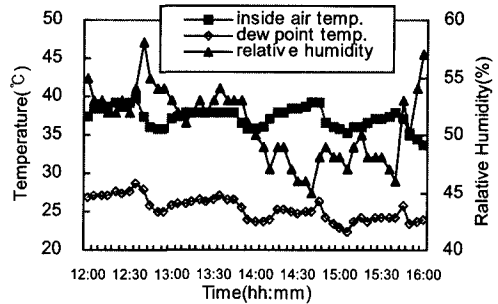


Fig. 2. Air temperature and relative humidity inside the roof in 29, June, 2006.

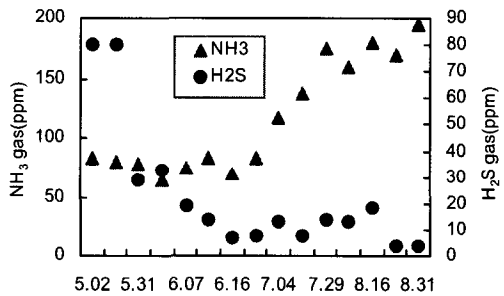


Fig. 3. Gas concentration inside the roof measured from May, 2006 to Aug., 2006.

3. 재료의 강도시험

액비저장조 지붕에 5년간 사용된 골조자재의 강도시험 결과는 Fig. 4와 같다. 골조자재의 재질은 일반구조용 강관(SS41)으로 직경 34 mm, 두께 1.8 mm의 아연도금파이프였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 동일한 구조물에서 채취한 시료임에도 불구하고 사용위치에 따라 부식상태가 현저히 다른 것을 알 수 있었다. 내부로 유입되는 외기에 빈번히 접촉하는 외곽부의 자재(A)는 표면의 아연도금만 부식되는 백화현상을 나타내거나 작은 점 형태의 부식초기로 평균 두께가 1.86 mm인데 비해, 가장 부식이 심한 중앙부위에 사용된 자재(C)는 완전히 부식되어 삭아 없어진 상

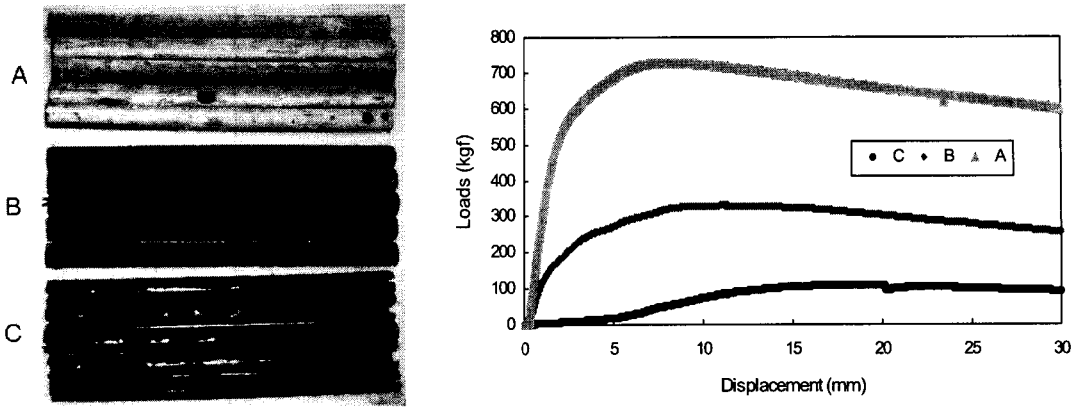


Fig. 4. The strength test result of 5 years used materials for the roof structure. (A - outside, B - middle, C - central)

태이거나 부식이 많이 진행되어 평균 두께가 0.86 mm로 줄어든 상태였다. 또한, 5년을 사용한 액비저장조 지붕구조재의 부식에 의한 강도저하는 설치초기의 3,812 kgf·cm²에 비해 66% 감소된 1,298 kgf·cm²로 나타나 구조물의 안전성 및 내구성에 심각한 결함이 있는 것으로 판단되었다. 따라서 밀폐형 액비저장조 지붕의 구조재로 아연도금강관을 사용할 경우 내구연한은 5년 미만으로 설정되어야 하고, 그에 따른 허용응력의 설계기준 결정에도 고려가 필요할 것으로 판단되었다.

또한 내식성 자재로서 검토한 알루미늄-아연 합금 도금 강관의 경우는 강도는 일반 구조용 강과 대등한 수준이었고, 스테인리스강관(STS439)의 경우는 강도가 일반구조용 아연도금강관에 비해 1.4배 이상 높은 것

로 나타났다.

Fig. 5에서 내식성 구조재료의 강도시험 결과, 초기강도 자체는 모두 구조용 자재로서 손색이 없었으나, 알루미늄-아연 도금 강관의 경우는 표면의 내식성과 경제성 측면에서는 우수하였으나 파이프 접합부위와 시공시 용접부위의 부식에 대한 기술적 대처가 어려운 문제점이 있고, STS304 스테인리스강은 내식성과 강도가 모두 우수하지만 가격이 2006년말 현재 일반 구조용강의 5배가 넘는 고가이므로 적용에 문제가 예상되어 본 연구의 대상에서는 제외하였다. 따라서, 내식성과 강도가 우수하고, 가격 또한 일반 스테인리스강인 STS304에 비해 상대적으로 저렴한 STS439강을 구조용 자재로 선정하였다. 또한, 일반적인 전기화학식의 아연도금에 비해

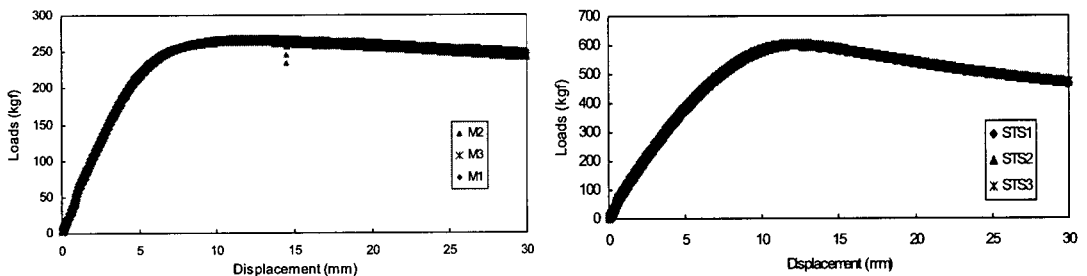


Fig. 5. The strength test result of two materials for the roof structure.

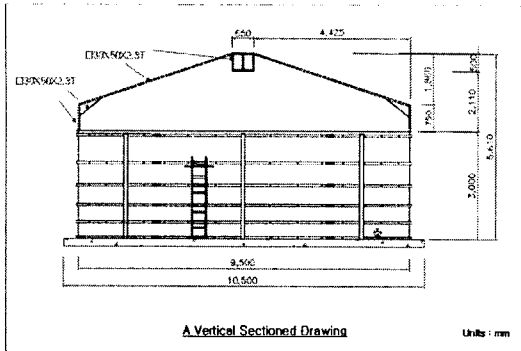


Fig. 6. A drawing of the developed roof structure model.

아연층의 도금두께가 두꺼워 상대적으로 부식지연효과가 있는 것으로 평가되는 아연용융도금 앵글과 아연도금강의 표면이 공기와 접촉하지 않도록 FRP수지를 피복한 구조용 각관을 지붕구조용 자재로 추가 선정하여 각각의 재료특성을 고려한 지붕모델을 설계하였다. 금속의 부식에 관한 연구는 단기간에 가능한 시험방법이 한국표준규격에 정해져 있기는 하지만, 액비저장조 지붕과 같은 특수한 환경조건에 대한 부식평가에는 적합하지 않은 것으로 판단되므로 현장설치를 통해 장기간의 관측과 평가가 필요할 것으로 판단된다. 또, 그 재료별 액비저장조 밀폐지붕 조건에서의 부식상황에 대한 결과는 추후 보고 될 예정이다.

4. 구조설계 및 구조안전성 분석

이상에서 검토·선발된 3 종류의 내식성 자재를 사용한 밀폐형 액비저장조 지붕구조 모델을 설계하고 구조적 안전성을 검토하였다. Fig. 6은 개발된 지붕모델의 설치 단면도를 나타낸 것이다. 지붕서까래의 경사각은 20°~23°의 범위에서 설계하였다.

탱크 직경 9.5m인 원형 액비저장조에 대하여 기존의 자재를 사용한 지붕모델과 내식성 자재를 사용한 지붕모델에 대하여 적설에 대한 구조안전성 분석을 수행한 결과를 Table 2에 나타내었다. 구조해석시 Fig. 4~Fig. 5의 강도시험 결과를 토대로 일반구조용강은 허용휨강도를 0.3Fy로, 내식성 자재는 허용휨강도를 0.5Fy로 각각 부식에 대한 안전율을 다르게 적용하여 계산한 값이다. 부식에 의한 자재의 휨강도 저하에 대한 정확한 기준설정은 향후 축산시설 구조자재의 부식에 의한 강도 변화에 대한 실험적 연구가 필요할 것으로 판단된다. 구조해석 결과, 동일 규격에 대하여 내식성자재를 사용한 지붕모델의 안전적설심은 최대 116.2cm로, 기존 모델의 13.3cm에 비해 8.7배까지 향상되는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 크기의 단면을 갖는 자재를 사용할 경우에도 최대 2.3배의 안전적설심을 가지는 것으로 분석되었다. 물론 이러한 결과는 액비저장조 탱크의 직경과 사

Table 2. Structural analysis results of roof models according to used materials

Diameter (m)	Material	Dimensions (W×H×T) (cm)	Safe snow depth (cm)	Maximum bending stress (kgf · cm ⁻²)	Allowable bending stress (kgf · cm ⁻²)
9.5	general (SS41)	∅34×1.8 (Z = 1.392cm ³)	13.3	731	734
	stainless steel (STS439)	□33×20×1.5 (Z = 1.312cm ³)	24.9	1,248	1,249
	zinc hot dipping (SGH400)	└50×50×4.0 (Z = 2.571cm ³)	62.9	1,426	1,427
	FRP resin covering (SGH400)	□50×30×2.3 (Z = 4.577cm ³)	116.2	1,423	1,427

용된 자재의 규격 및 수량에 따라 조금씩 달라질 수 있으나 내식성 자재를 사용한 액비저장조 밀폐형 지붕구조물의 최적설계를 위한 좋은 기준자료로 활용이 가능할 것으로 기대된다.

적 요

악취가스의 대기확산을 방지하고, 액비의 발효를 위한 폭기장치의 가동을 정상화하여 액비저장조의 활용도를 높이고, 내식성 자재를 사용하여 구조적 안전성을 개선하기 위한 목적으로 액비저장조 밀폐형 지붕구조 모델을 개발하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 액비저장조 및 지붕구조의 이용실태 조사결과, 악취가스의 발생으로 인한 민원 때문에 폭기장치 가동을 중단하고 있거나 특정 시기에 한해 가동하는 농가가 대부분이었으며, 일반구조용 아연도금강판을 사용한 지붕구조재의 부식이 다른 시설보다 빠르게 진행되고 있음을 확인하였다.

2. 구조자재의 강도시험 결과, 5년 동안 사용한 밀폐형 지붕구조재의 경우 초기 강도의 34%까지 강도가 감소되는 등 부식에 의한 구조물의 강도저하가 심각하였으며, 내식성 자재로 선발된 스테인리스(STS439)강의 경우 일반구조용강에 비해 1.4배 높은 강도를 나타내었다.

3. 직경 9.5m인 원형 액비저장조에 대하여 기존의 자재를 사용한 지붕모델과 내식성 자재를 사용한 지붕모델에 대하여 적설에 대한 구조안전성 분석 결과, 기존 자재를 사용한 경우에 비해 동일한 단면크기를 갖는 내식성 자재를 사용한 경우 적설에 대한 안전성이 약 2.3배까지 향상된 것으로 나타났다.

이상과 같이 본 연구에서 개발된 액비저장조 지붕모델은 밀폐형이므로 폭기시 발생하는 악취가스가 대기중으로 확산되지 않으며,

그 골조를 내식성이 우수한 스테인리스강, 아연용도금강, FRP수지피복강을 사용하여 내구년한을 증가시킴으로써 구조적 안정성이 크게 향상되었다. 단, 금속재료의 부식에 대한 문제는 좀 더 장기간의 관찰과 실험을 통해 액비저장조 및 축산시설 고유의 부식속도를 구명하는 연구가 필요한 것으로 판단된다.

인 용 문 헌

1. 남상운. 2001. 파이프 골조 온실의 유지보수 보강 기술 개발. 농림부 연구보고서.
2. 윤남규, 이성현, 김경원, 염성현, 조용호. 2008. 부식과 악취가스 대기확산 방지를 위한 액비저장조 밀폐형 지붕구조 개발. 한국축산시설환경학회 발표논문집 13:107-117.
3. 윤남규, 이성현, 김경원. 2006. 돈사 액비저장조 지붕구조 안전성 향상 연구. 농촌진흥청 농업공학연구소 시험연구보고서 pp. 195-203.
4. 윤남규, 이성현, 홍영기, 김경원, 조용호. 2006. 구조안전성 향상을 위한 액비저장조 지붕구조모델 개발. 한국생물환경조절학회 발표논문집 15(2):369-372.
5. 이성현, 윤남규, 김경원, 이인복, 김태일, 장진택. 2006. 양돈슬러리의 암모니아 발생 특성에 관한 연구. 축산시설환경학회지 12(1):7-12.
6. 이성현, 조한근, 최광재, 오권영, 유병기, 장동일. 2004. 돈사의 하절기 암모니아 발생특성 및 환경변화 분석. 한국농업기체학회 2004년 동계 학술대회 논문집 9(1).
7. 이성현, 조한근, 이인복, 김경원, 최광재, 오권영, 유병기, 김태일. 2005. 우드칩을 이용한 양돈슬러리 발생 암모니아 탈취성능. 한국축산시설환경학회 동계학술대회 논문집.
8. 환경부, 건설교통부, 농림부, 축협중앙회. 1999. 축산분뇨 자원화시설 표준설계도.