

여름철 자연증발시스템(NES)의豚슬러리 증발효율 평가

김기연·최홍림·김진길
서울대학교 농생명공학부

Estimation of Evaporation Rate of Swine Slurry Using the Natural Evaporation System(NES) in summer

K. Y. Kim, H. L. Choi and J. G. Kim,

School of Agricultural Biotechnology, Seoul National University

ABSTRACT

The purpose of this study was to establish the optimal operation condition of the natural evaporation system(NES) which was used for reducing swine slurry. Especially the main point of this study is to estimate the effect of climate condition(clear & rainy) and spray type(batch & flow) for the evaporation rate of swine slurry applying the NES in summer. Experiment was performed from June to August, which was generally regarded as summer in Korea, with the spray type of batch in 2000 and that of flow in 2001. As a result of experiment for batch and flow type, the averaged evaporation rate was measured into 2.71 and 3.59 $\ell / \text{ton} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{day}$ on clear days and 0.62 and 0.66 $\ell / \text{ton} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{day}$ on rainy days, respectively. Based on the calculated evaporation rate by the climate condition and the spray type, it was proved that the averaged reduction rate for total input(1t/day) were 15.99% and 3.19% on clear and rainy days and the evaporation rate of the flow type was superior to that of the batch type by 5%, approximately. Therefore, it was concluded that the supplementary equipment, such as fan, should be operated in rainy days and the spray type of flow rather than that of batch should be recommended to increase the evaporation rate in the natural evaporation system(NES).

(Key words : NES, Swine slurry, Climate condition, Spray type, Evaporation rate)

I. 서 론

축산농가의 가축분뇨 관리는 사회적 현안이지만 이의 적용시스템은 기업농과 영세농이 양극화되어 있는 우리 나라 축산환경에 맞도록 기술적으로 안정적이며, 경제적이여야 한다. 따라서 최근 자연증발시스템(Natural Evaporation System; NES)에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이는 NES를 기업축산농에서는 전처리시스템으

로, 영세축산농에서는 주처리시스템으로 사용할 수 있기 때문이다. 자연증발시스템은 자연 에너지를 이용하여 돈슬러리를 증발시켜 감량화하는 시스템으로, 주로 일본에서 먼저 이루어졌다. 예를 들면, 증발포를 이용한 兵庫현 시스템과 市戸현 農總試畜研 시스템(Kozi, 1989), 다단계 증발판을 이용한 千葉현 축산센타시스템(Seishu, 1994) 등이 대표적인 경우이다. 미국의 경우 증발현상을 통한 돈슬러리 감량화 처

본 연구는 산업자원부의 공업기반기술사업의 지원으로 (주) 쌍용양회와 공동으로 수행되었음.

Corresponding author : K. Y. Kim, Lab. of Animal Environment, Seoul National University, Suweon, 441-744, Korea. Tel : 82-31-290-2806, Fax : 82-31-290-2345

리에 자연증발시스템을 적용한 예는 없다. 다만 모사강우기(rainfall simulator)를 이용한 관개수의 증발 현상에 대한 연구는 아래의 몇몇 연구자들에 의해 수행되었다. 스프링클러(sprinkler)를 통해 토양으로 살포한 관개수의 증발량 평가 연구에서 Yazar(1984), Kincaid(1996), Kincaid et al.(1996)은 2%~40%, Kohl et al.(1987)은 0.5%~20% 정도가 증발현상으로 인해 관개수가 손실된다고 보고하였다. 증발상 변화에 영향을 주는 요인으로 Edling(1985)은 살포기의 노즐(nozzle)을 통해 살포되는 수분 입자의 크기가 클수록 증발 효율이 낮아진다고 하였으며, 입경이 1.5~2mm 이상의 수분 입자는 액체에서 기체로의 상전환(phase conversion)이 현상에서는 거의 발생하기 어렵다고 하였다. 살포되는 수분 입자내 용해되어 있는 물질의 성분 및 농도가 증발상의 변화에 영향을 준다는 연구들도 있는데, 이들에 의하면 수분내 용해되어 있는 물질이 고분자이며, 농도가 높을수록 증발 효율이 낮아진다고 보고하였다(Ranz and Marshall, 1952; Charlesworth and Marshall, 1960; El Golli et al., 1974; Leong, 1981; Messing et al., 1993; Jayanthi, 1993; Yu, 1995). 물론 외부 기후 조건의 변화를 주요 변인으로 제시한 Tarjuelo et al.,(2000), Yazar(1984) 등의 연구들도 있으며, Kincaid와 Longley(1989)는 高濕과 低濕의 기상조건이라 하더라도 증발로 인해 손실되는 관개수의 양은 전체 살포량의 2~3% 정도 밖에 되지 않는다고 하였다.

이러한 증발 현상을 물리화학적 요인들과의 접목을 통해 수식화 하는 연구들도 있었다. Yazar(1984)는 통계적 접근을 통해 sprinkler를 통한 증발현상을 다음과 같이 수식화하였다.

$$E = 0.389e^{(0.18W)}(e_s - e_a)^{0.7} \quad (1)$$

여기서,

- E : 증발로 인한 손실 수분포텐셜(%),
- W : 풍속(m/s)
- e : neperian logarithm base
- ($e_s - e_a$): 증기압의 차이(kPa)

한편, Murray(1967)는 식 (1)의 증기압차($e_s - e_a$)를 식 (2)와 같이 定式化하였다.

$$(e_s - e_a) = e_s(1 - H/100) = 0.611 \exp(17.27T_a / (237.3 + T_a))(1 - H/100) \quad (2)$$

여기서,

- e_s, e_a : 포화증기압, 대기의 실제 증기압(kPa)
- T_a : 대기의 온도(°C)
- H : 상대습도(%)

또한 Campbell(1995)은 ($e_s - e_a$)를 濕球差(wet-bulb depression, $T_a - T_w$)의 함수로 식(3)과 같이 定式化하였다. 단, P는 대기압(kPa)을 나타낸다.

$$(e_s - e_a) = 0.00066 (1 + 0.00115T_w)(T_a - T_w) P \quad (3)$$

살포기를 통한 농업 灌溉水の 증발 손실량 연구에 초점을 둔 미국의 사례가 있는가 하면, 가축분뇨를 대상으로 증발을 통한 감량화를 유도한 연구는 일본에서만 한정적으로 수행되어 왔는데, 이에 대한 구체적인 연구 내용은 다음과 같다.

Fig. 1-(a)는 현재 일본 千葉현에서 운영 중인 다단계 증발판 이용방식의 증발시스템으로 축사의 상부에 증발장치를 설치하고, 태양에너지와 풍력에너지를 이용하여 뇨오수의 증발을 유도하는 방식이다. 처리시설은 用地와 운영비 등의 문제를 최소화하기 위해서 철골로 3층 구조물로 축조하여 1층은 가축의 사육시설, 2, 3층은 뇨오수 증발공간으로 건축하였다. 뇨오수 증발처리 공간인 2, 3층은 다단계로 판(경사를 줌)을 설치하였으며, 뇨오수를 최고 윗판에서부터 차례로 흘러내리게 한다. 그 과정에서 태양에너지와 증발판 사이를 통한 자연풍에 의해 뇨오수의 증발을 유도하는 방식이다. 이러한 방식도 증발천에 의한 증발방식과 마찬가지로 증발능력이 기후에 따라 영향을 받으며, 겨울철과 장마철에는 증발능력이 저하된다는 것이 입증되었다. 축사의 부지면적은 144m², 설치된 증발판의 총 면적은 791m²(남북방향으로 각 3

시스템이라 할 수 있다. 처리능력은 겨울철에는 $10\text{kg/m}^2 \cdot \text{일}$ 정도로 여름철(6, 7, 8월)의 1/5 수준이며, 이러한 겨울철 증발량 저하의 비효율성을 제고하기 위해 전체 처리시스템을 하우스 시설로 밀폐하여 태양열을 이용하였으며, 강제송풍 장치도 설치하여 증발능력이 2배정도 증가된 연구보고가 있다(Nakasaki, 1986).

이러한 국외의 연구결과들을 고찰해 볼 때 가축분뇨 처리를 목적으로 한 자연증발시스템의 운용은 경제적으로 열악한 국내의 축산환경에 있어 적합한 가축분뇨처리 시스템으로 판단된다. 그러므로 외부 기상조건에 따른 증발량 변화에 대한 실증적인 연구가 계속해서 뒷받침된다면 중소규모 축산농가의 최대 걸림돌인 가축분뇨를 쉽게 해결할 수 있는 자연증발시스템의 운용방식이 정립될 것이다.

따라서 본 연구에서는豚슬러리 처리량의 減量化를 위하여 자연에너지를 이용한 자연증발시스템을 설계 제작, 여름철 기상조건에 따른豚슬러리의 증발 및 건조효율 평가와 이에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 장치

서울대 농생대 부속목장에 $6\text{m(W)} \times 10\text{m(L)} \times 4.2\text{m(H)}$ 규모의 비닐하우스를 설치한 후 내부에 Fig. 2와 같은 자연증발시스템을 시설하였다. 기본적으로豚슬러리 1회 투입시 약 1.5톤 정도를 왕겨 깔개에 살포시켜 자연증발을 유도할 수 있도록 살포장치를 장착하였으며, 입구 前面 양쪽에는 두 개의 입기팬($85 \text{ m}^3/\text{min}$)을, 後面 양쪽에는 배기팬($75\text{m}^3/\text{min}$)을 설치하여 증발효율이 저조한 雨期時나 습도가 높은 날에만 작동시키도록 설계되어 있으나, 이번 실험에는 외부 자연에너지만을 이용한 증발효율 평가에 초점을 두었기 때문에 작동되지 않았다. 살포기는 시스템내 양측에 설치되어 있는 roller에 의해 자동 왕복운동을 하며豚슬러리가 깔개에 골고루 살포되도록 설계되었다. 살포 후 유출저류조로 배출되는 잔여豚슬러리는 일정간격으로 바닥에 설치된 ditch(폭 100 mm

Fig. 1. The evaporation system operated in Japan.

열 배치, 10층으로 한 경우)로 물로 실험한 경우의 증발능력은 축사 부지면적으로 환산시, 여름 평균 $3.2\text{kg/m}^2 \cdot \text{일}$ 정도, 겨울철에는 $2.6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{일}$ 정도의 증발율을 나타내었다(Seishu, 1994).

Fig. 1-(b)는 현재 일본 兵庫현에서 운영 중인 증발포 이용방식의 증발시스템으로 하우스 내에서 자연송풍을 이용하여 증발효율을 제고시키고, 시설비의 최소화를 위하여 증발천을 이용한 방식이다. 이 시스템은 상하 로울러에 비닐제품의 천(폭 1m)을 걸쳐 상부 로울러로 회전구동하여 천의 하부 15cm 정도는 언제나 乾오수에 잠겨있으며, 천에 흡착된 수분은 대류에 의해 대기 중으로 증발되는 형태이다. 이러한 시스템은 자연환기의 열에너지를 이용하여 천에 흡수된 수분의 증발을 유도하기 때문에 운영비는 회전원판시스템에 비해서 매우 적다. 그러나 겨울철 저온에서 수분을 흡수한 천이 결빙되어 증발을 충분히 유발하지 못하기 때문에 비교적 온난한 지방에 적용할 수 있는

Fig. 2. Sketch of the NES(natural evaporation system) for swine slurry.

Fig. 3. Photograph of the NES

× 깊이 80mm)를 통해 배출되도록 제작하였다. 또한 ditch내 다른 외부 이물질이 유입되지 못하도록 ditch 내부에 쇠석을 채운 후 상부에 망(hole 5mm) 처리를 했다. 그 위에 처리여재로 왕겨갈개를 바닥으로부터 약 5cm 정도의 높이가 되도록 피복하였으며, 외부 양쪽에는 유입 저류조와 유출저류조를 설치하였는데, 이들의

용량은 각각 1.7톤 (122.3m×224.3m ×62m), 1.5톤 (122.6m×214.5m×62m)을 저류할 수 있도록 제작되었다.

2. 실험설계

자연증발시스템 운용시 여름철 기상조건에

Table 1. Experimental design

Treatment	Conditions	Period (year/month)	Spray time	Total amount of spray	Forced ventilation
Batch type		2000/6~8	one time	1.5 ton	not adjusted
Flow type		2001/6~8	nine times	1.44 ton (not consistent)	not adjusted

따른豚슬러리 증발량을 규명하기 위해 2000년도와 2001년도의 하절기(6~8월) 기간동안 실험을 수행하였다. 시스템 내 바닥에는 왕겨를 높이 15cm정도, 약 450kg(질량 기준)을 피복하여 여재내 미생물 군집상의 분해열에 의한 증발효율을 높이고자 하였다. 실험 변수로는 살포횟수에 초점을 맞추었는데, 2000년도에는 일사량이 가장 높은 시간대인 오후 12시~1시에豚슬러리 유입량 1.5톤 전량을 살포하는 batch 형태로 실험을 진행하였다. 2001년도에는 유입 펌프에 timer를 설치, 오전 9시부터 오후 5시까지 시간마다 2분 살포하고 58분 휴지간격을 갖는 flow 형태로 실험을 수행하여 두 살포 유형(batch & flow type)간의 증발효율을 비교하였다. 자연증발시스템에 설치된 nozzle이 2분 동안 살포되는 양은 대략 0.16톤으로 하루 9번 살포시 총 1.44톤이 살포되어 유입 저류조 전체 용량인 1.5톤에 가깝도록 살포횟수를 설정하였다. 그러나, 실험에 이용된豚슬러리가 고액분리 과정이 적용되었음에도 불구하고 상당한 양의 협잡물이 포함되어 있어 살포시 nozzle이 부분적으로 막히는 현상이 발생, 실제 하루 동안 측정된 살포량은 0.8~1.3톤 범위로 유동적이었다. 여름철 기상조건에 따른 순수 외부 자연에너지만을 이용해 증발되는豚슬러리 양을 관찰하기 위한 목적으로 배풍기와 배기팬을 작동하지 않는 대신 양쪽 side curtain만을 지상에서 30cm 개방한 조건하에서 두 유형의 실험을 수행하였다.

3. 실험방법

(1) 기상 요인 측정

Fig. 4에 나타난 바와 같이 온도와 상대습도

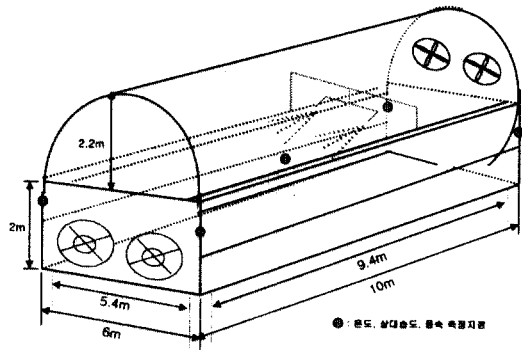


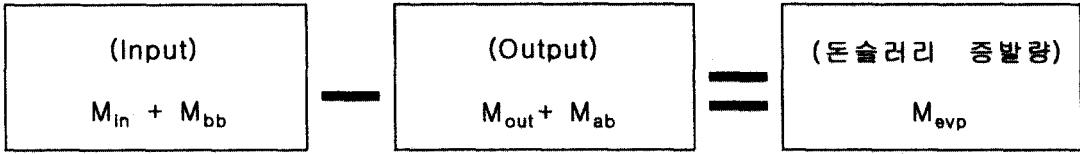
Fig. 4. Measurement site of the exterior climate factor(temperature, relative humidity, air velocity) in the natural evaporation system.

의 경우 증발건조시스템 내 다섯 지점에 sensor를 달고 data acquisition system인 hybrid recorder(Esterline, ANGUS)에 연결하여 측정하였다. 풍속은 풍속계(GANOMAX, Model No. 1006)를 통해 온도와 상대습도의 측정지점과 동일한 다섯 지점에서 측정하였으며, 일사량은 일사계(Turbus, Model No. : PCM-03F)를 이용하여 시스템 내부 정중앙 지점에서 측정하였다. Batch type의 경우 온도와 상대습도는 한번 살포되는 한 시간동안 기록된 평균값을, 풍속과 일사량은 10분 간격으로 측정한 총 6번의 평균값을 대표치로 설정하였다. Flow type의 경우 측정 시기를 오전 9시, 오후 1시, 오후 5시로 설정하여 하루 세 번 측정한 값의 평균치를 그 날의 대표치로 설정하였는데, 요인별 측정 방법은 batch type과 동일하다.

(2) 증발량 측정

자연증발시스템(NES)을 통한豚슬러리 증발

$$M_{evp} = [M_{in} + M_{bb}] - [M_{out} + M_{ab}]$$



여기서, M_{evp} : 자연증발시스템(NES)의 -일 증발량, L/day
 M_{in} : 깔개상 돈슬러리 살포량, L/day
 M_{bb} : 살포 전 깔개床의含水量, L/day
 M_{out} : 다음 날 돈슬러리 살포 전까지의 침출수량, L/day
 M_{ab} : 살포 후 깔개床의含水量, L/day

량 산출은 豚슬러리 살포 전후 왕겨여재의 함수율 차이를 이용하였다. 이는 질량보전의 법칙(the law of mass conservation)에 근거한 것으로 액상 살포량과 살포전 왕겨의 수분량을 합한 값에서 살포된 다음 일정시간 이후의 왕겨 수분량과 그 동안의 액상 유출량을 뺀 값으로 얻을 수 있었다. 살포 전후 왕겨여재의 함수율 측정은 다음과 같은 실험 절차에 의해 진행되었다. 먼저 바닥에 깔린 여재층에 대해 임의의 다섯 지점을 선정, 각 지점에서 5g 정도 채취된 왕겨를 혼합 후 중량을 측정하였다. 다음 공정시험방법에 의거, 105℃ 건조기(dry oven)에서 2시간 동안 건조시킨 후의 왕겨 중량을 측정하였다. 마지막으로 건조 전후의 왕겨 중량 차이를 계산한 다음 왕겨 여재층의 총부피(540cm×440cm×12cm)로 환산한 값을 자연증발시스템 바닥에 피복된 전체 왕겨의 수분량으로 추정하였다.

(3) 통계처리

SAS package('96 version)를 이용하여 豚슬러리 증발량과 외부기상요인(온도, 습도, 풍속, 일사량)과의 상관관계를 다중회귀분석(multiple linear regression) 방법을 통해 규명하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 증발이론에 대한 고찰

수분의 증발이란 수면과 공기가 접하는 과정

에서 수면에서 공기중으로 흡수되는 물분자가 공기중에서 물속으로 들어오는 물분자보다 많아서 물이 줄어드는 현상을 말하며, 수분의 증발에 영향을 미치는 요인으로는 물의 온도, 경계층에서의 바람의 속도, 복사에너지, 공기중의 상대습도 및 증발면적 등에 영향을 받는다. 먼저 물의 온도가 높으면 물분자간의 상대적인 거리가 멀어지고, 증발에 필요한 열에너지의 양이 줄어들기 때문이다. 따라서 온도가 높을수록 증발량은 많아진다. 경계층의 공기유속은 수분의 강제흡수 영향 뿐만 아니라, 상대습도가 낮은 외부의 공기를 유입하므로 내부의 수증기분압을 낮추는 역할을 한다. 따라서 유속이 빠르면 증발량이 증가한다. 다른 외부의 에너지원이 없이 태양에너지에 의한 열공급이 이루어질 경우, 수면의 온도를 상승시키는 원인이 되며, 태양에너지에 의한 내부의 온도 상승은 포화증기압을 높혀 주기 때문에 수면으로부터 수증기 증발이 유도하는 역할을 한다. 따라서 태양복사에너지가 클수록 증발량은 증가하게 된다. 또한 공기의 상대습도는 외부의 물분자의 흡수에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 공기가 포화증기압에 가까울수록 수분의 흡수량이 줄어들기 때문이다. 따라서 수면위 공기의 상대습도가 낮을수록 증발을 빨리 일어난다. 마지막으로 증발량에 영향을 미치는 요인으로 증발면적이다. 이는 보다 많은 면적의 수면이 공기와 접하고 있으면, 수분의 흡수가 많기 때문이다. 그러므로 증발면적이 넓으면 증발량이 많아진다.

궁극적으로 증발량을 추정하기 위해서는 대부분의 변수들이 압력에 의한 차이에 따라 증발량이 결정된다는 것을 알 수 있다. 그러나 현장에서 다양하게 변하는 자연조건의 물리적인 변수를 실시간으로 처리하여 증발량을 추정하는 일은 쉬운 일이 아니다. 또한 각 변수들의 상관관계를 고려하면 위의 내용을 독립적으로 산술적 해석은 불가능하다.

따라서 물질전달에 의한 방법을 이용하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 증발 현상에 관한 물질전달 이론은 Prandtl과 Schmidt의 혼합길이와 Taylor의 연속혼합개념에 의한 두 가지 과정으로 구분되며(Welty, 1984), 그들이 제시한 식 (1)을 통해 수증기의 q의 확산과정을 나타낼 수 있다.

$$\frac{q}{t} = u \nabla K_c \nabla q \quad (1)$$

여기서, q : 습도, %
t : 시간, 분
u : 평균 풍속, m/초
K_c : 상수

또한 수면 표면에서의 유속이 증발량에 영향을 미칠 뿐만 아니라 증발에 영향을 미치는 공기층별 유속의 변화를 고려한 증발량은 식 (2)를 통해 표현할 수 있다.

$$E_h = \frac{-K^2 \rho (q_2 - q_1) (u_2 - u_1)}{(\ln z_2/z_1)^2} \quad (2)$$

여기서, ρ : 공기밀도, kg/m³
z : 공기층 높이, cm

위의 식을 이용하여 증발량을 추정하기에는 일반적으로 Mass-Transfer Theory에 의한 이론식이 단열대기에 한하여 성립하므로 많은 가정조건이 필요하며, 현장에서 실제 적용하기에는 한계가 있다. 그러므로 물질전달에 의한 이론식을 실제로 응용하기 위해서는 감도와 정밀도가 높은 측정계의 사용과 특수한 기술을 필요로 한다. 따라서 증발량 추정을 위해서는 경

험식을 많이 이용한다. 따라서 식 (2)를 다음과 같은 Dalton 형의 식 (3)으로 변환시킬 수 있다.

$$E_h = F(v) (H_w - H_a) \quad (3)$$

여기서 H_w는 증발면의 온도에 의한 포화증기압, H_a는 어떤 고도에서의 실제 증기압, f(v)는 바람의 함수인 wind factor로서 일반적으로 f(v)=a+bv(a와b는 상수)로 표시하고 때로는 n이 0.5와 1사이의 지수를 가진 f(v)~vⁿ의 함수로도 표시한다.

2. 여름철 기상조건에 따른 豚슬러리 증발량 비교

외부 기상요인(온도, 상대습도, 풍속, 일사량)의 변화와 살포형태(Batch type & flow type)에 따른 여름철(6~8월) 乾期와 雨期시의 豚슬러리 증발량 및 각 기상요인별 증발량간의 상관관계는 다음과 같다.

(1) 乾期(Clear days)

(가) 살포형태에 따른 豚슬러리 증발량 비교
6월 25일부터 8월 31일까지 두 해(2000, 2001년)에 걸쳐 진행된 실험 결과, 살포형태에 따른 豚슬러리 증발량의 경시적 변화 양상(Fig. 5 참조)을 살펴보면 batch 형태보다는 flow 형태로 자연증발시스템을 운용했을 때가 증발효율이 대체로 높은 것으로 나타났다.

이는 豚슬러리 1ton 살포를 기준으로 증발량을 산정한 것으로 batch 유형 처리구의 경우 평균 137.49(살포 바닥 면적당(m²) 환산시 2.71 ℓ/m²·day), flow 유형 처리구의 경우 평균 182.32 ℓ(살포 바닥 면적당(m²) 환산시 3.59/m²·day)의 증발율을 나타낸 것으로 분석되어 乾期시 살포방식을 flow 형태로 자연증발시스템(NES)을 운용했을 경우 batch 형태보다 약 0.9 ℓ 정도 증발율을 향상시켰음을 알 수 있다.

(나) 살포형태에 따른 외부 기상요인과 豚슬러리 증발량간의 상관관계

Fig. 6에 나타난 바와 같이 여름철 乾期시

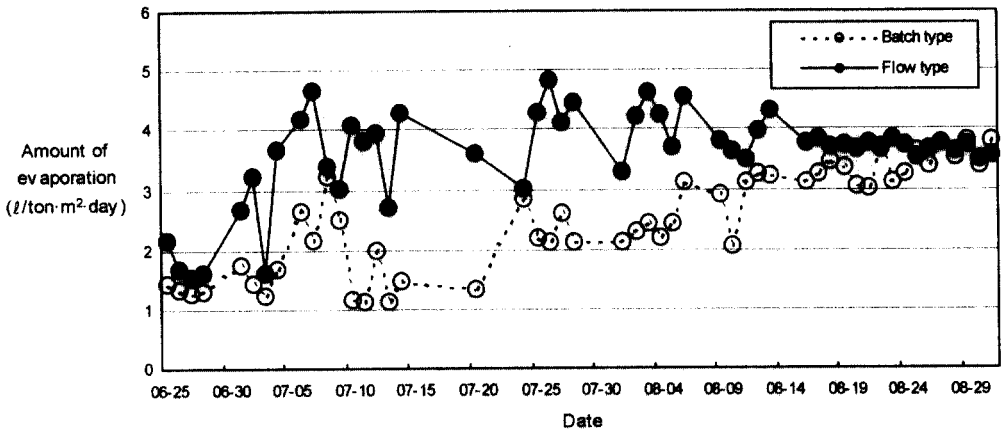
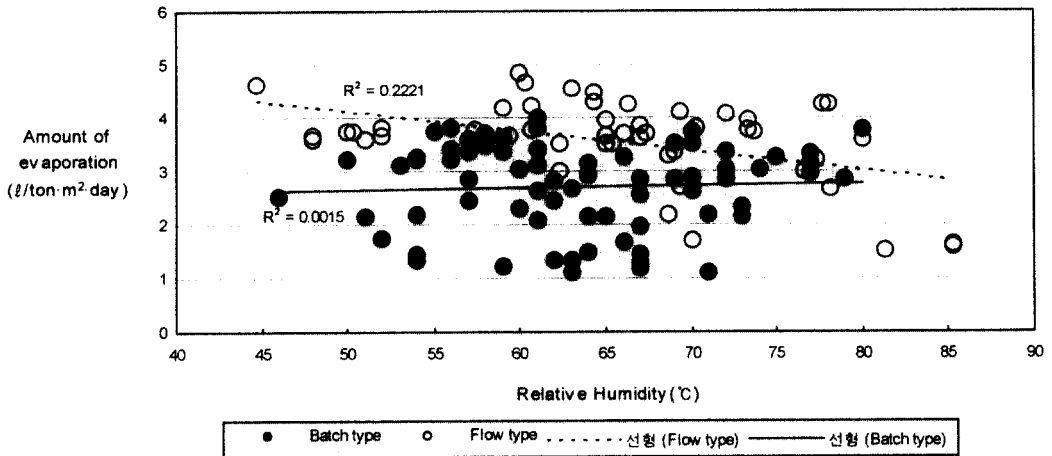
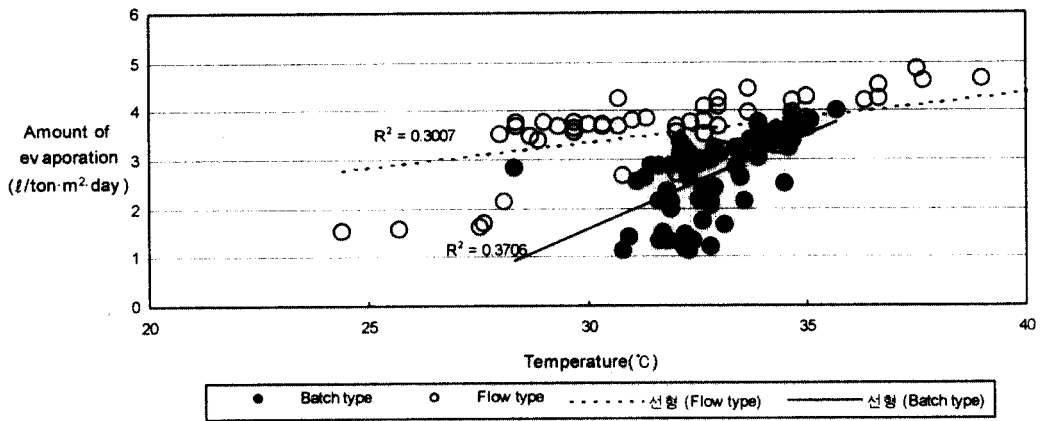


Fig. 5. Change of evaporation rate on swine slurry as spray type(Batch & Flow) on clear days in summer(June to August).



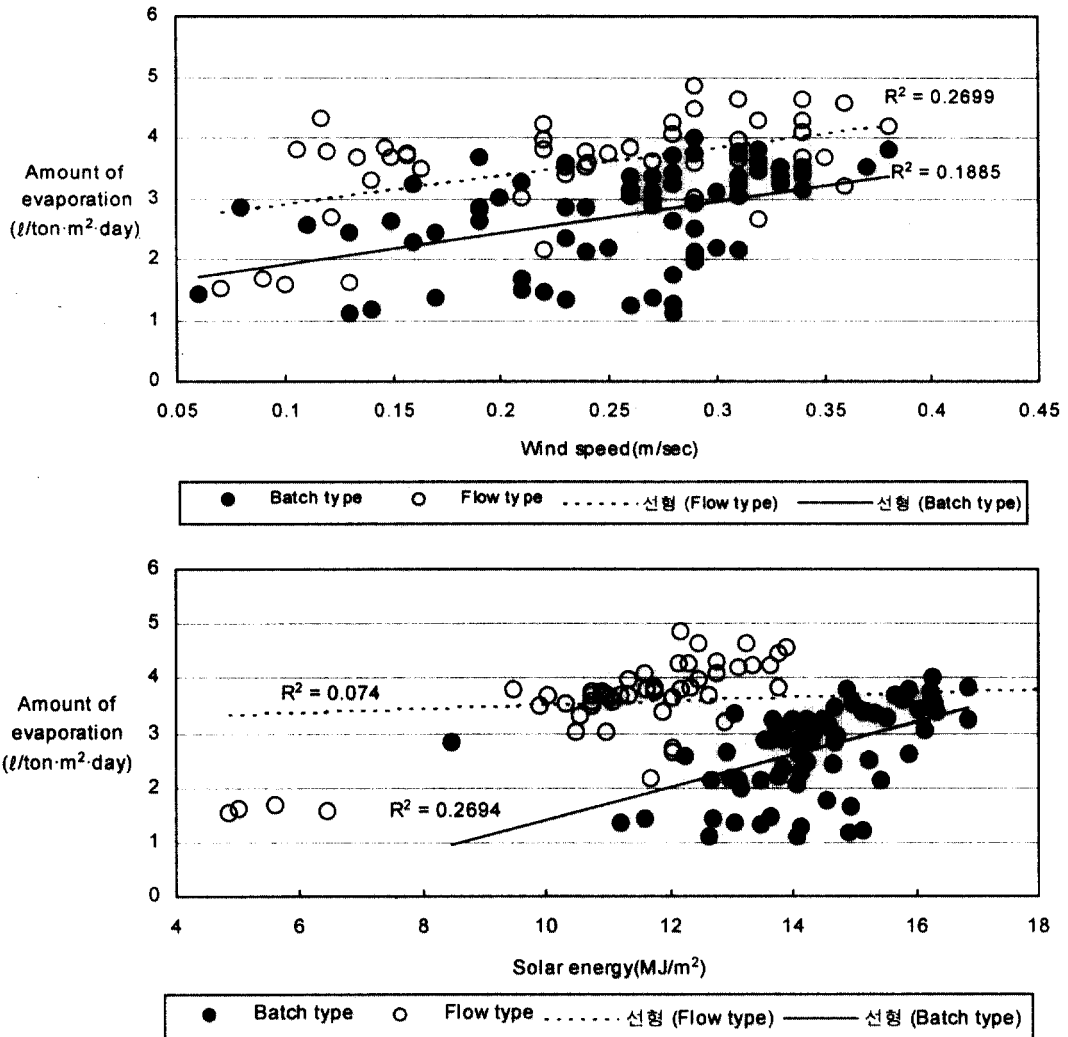


Fig. 6. Correlation of climate condition(Temperature, relative humidity, wind speed, and solar energy) and evaporation rate on swine slurry as spray type(Batch & Flow) on clear days in summer(June to August).

살포형태에 따른 외부 기상요인(온도, 상대습도, 풍속, 일사량)과 豚슬러리 증발량과의 상관관계를 살펴보면 batch 형태의 경우 온도 0.3706, 상대습도 0.0015, 풍속 0.1885, 일사량 0.2694로 나타난 반면, flow 형태의 경우 온도 0.3007, 상대습도 0.2221, 풍속 0.2699, 일사량 0.0074로 분석되었다. 또한 이들 요인과 증발량 간의 상관성은 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났으나, 약간의 상관관계는 나타내는 것으로 분석되었다. 이러한 결과가 도출되게

된 이유는 증발상에 영향을 미치는 네 가지 외부 기상요인들이 각각 독립적인 절대적 변수로서의 역할을 한 것이 아니라, 상호 복합적으로 동시에 작용했기 때문이라 생각된다. 살포 유형별 네 가지 기상요인의 증발을 상승 기여도를 살펴보면 batch 형태의 경우 온도>일사량>풍속>상대습도, flow 형태의 경우 온도>풍속>상대습도>일사량 順으로 조사되어 두 처리구 모두 대체로 온도가 증발상 변화에 가장 큰 영향을 준 요인으로 입증되었고, 다음으로 풍속,

일사량, 상대습도로 분석되었다. 이는 자연증발 시스템 내부의 온도 상승이 살포된 수분입자를 기체로의 상전환(phase conversion)을 유도하는 가장 직접적인 기상요인으로 작용했기 때문이며, 증발상을 유지하기 위한 적정 수준의 온도 보존은 시스템을 둘러싸고 있는 비닐에 의해 외부로의 열손실을 최대한 억제했기 때문이라 사료된다. 풍속의 경우 이론적으로 온도와 더불어 증발을 상승을 부가시키는 주요 기상요인으로 인지되나, 시스템이 위치한 지리학적 특성으로 인해 실제 시스템 내부로 유입되는 풍속이 0.5m/sec 이하로 측정되어 예상했던 상관성에 미달되는 것으로 판단된다. 시스템 내부에 형성된 열에너지는 주로 왕겨여재내 종속영양 미생물 군집의 豚슬러리 분해로 인해 발생하는 분해열과 日射 작용으로 인해 생성된 열에너지에 의한 것으로 판단되며, 본 시스템이 비닐로 외부와 차단되어 있어 열에너지의 방출이 거의 이루어지지 않아 氣化 현상을 적정수준으로 유지시켜 주는 이유로 상대습도와 증발량간의 부(-)의 상관성이 비교적 낮게 나타난 것으로 추정된다.

(2) 雨期(Rainy days)

(가) 살포형태에 따른 豚슬러리 증발량 비교

Fig. 7에 나타난 바와 같이 살포방식을 batch 형태로 실험한 2000년에는 6월 25일부터 8월

31일까지 강수량 5mm 이상 기록한 날이 총 12일, flow 형태로 실험이 진행된 2001년에는 총 10일로 관측되었다. 특히 강수량 100mm 이상을 기록한 날들은 7월 20일부터 8월 10일 사이에 집중되어 있어 장마철이 이 기간에 형성되었음을 알 수 있다. 살포형태에 따른 豚슬러리 증발량의 경시적 변화 양상을 살펴보면 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 1ton 살포 기준시 batch 유형 처리구의 경우 평균 31.68 l(살포 바닥 면적당(m²) 환산시 0.62 l/m²·day), flow 유형 처리구의 경우 평균 32.23 l(살포 바닥 면적당(m²) 환산시 0.64 l/m²·day)의 증발율을 기록한 것으로 분석되어 雨期시 flow 형태로 자연증발시스템을 운용하는 것이 batch 형태보다 약 0.2 l 정도 증발 상승 효과를 나타낸 것으로 조사되었지만, 원형 규모의 자연증발시스템(NES)을 고려하면 그 차이는 경미한 것으로 판단된다.

(나) 살포형태에 따른 외부 기상요인과 豚슬러리 증발량간의 상관관계

Fig. 8에 나타난 바와 같이 여름철 雨期시 살포형태에 따른 외부 기상요인(온도, 상대습도, 풍속, 일사량)과 豚슬러리 증발량과의 상관관계를 살펴보면 batch 형태의 경우 온도 0.6098, 상대습도 0.4625, 풍속 0.9488(p<0.01), 일사량 0.7533(p<0.05)으로 나타난 반면, flow 형태의 경우 온도 0.0781, 상대습도 0.0992, 풍

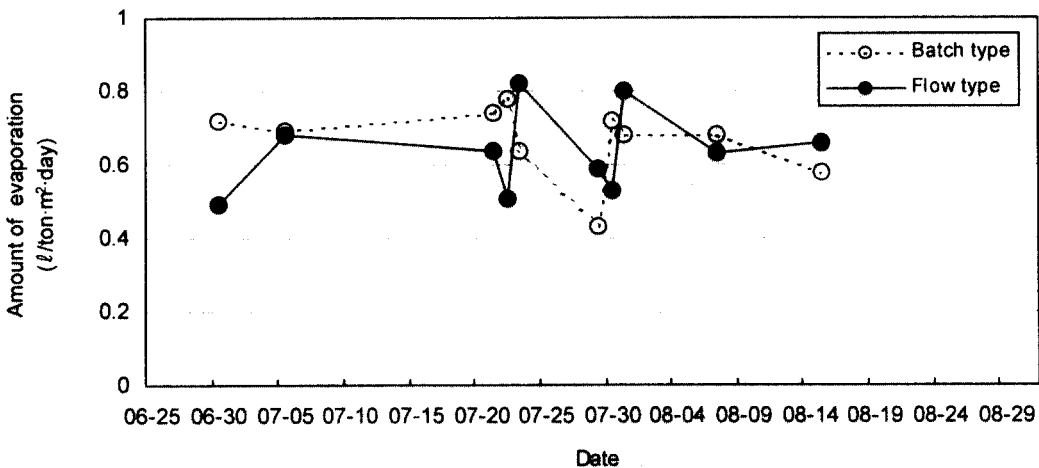
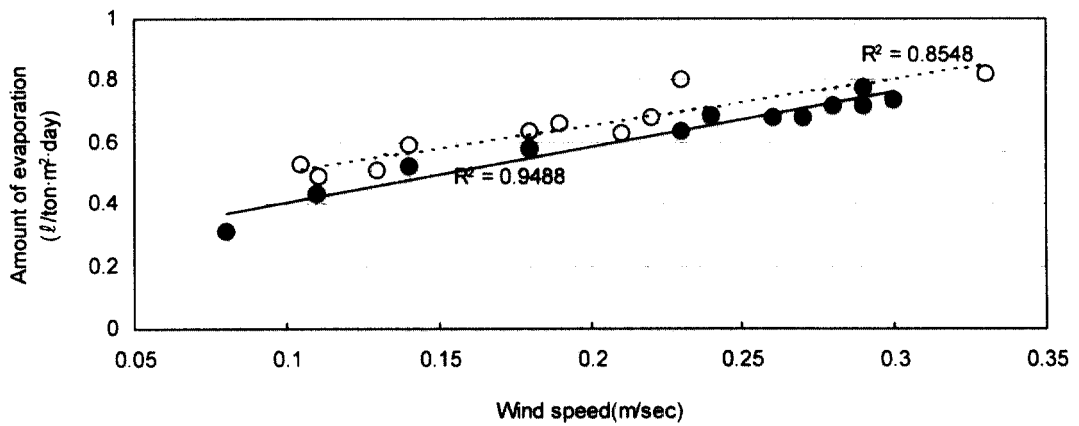
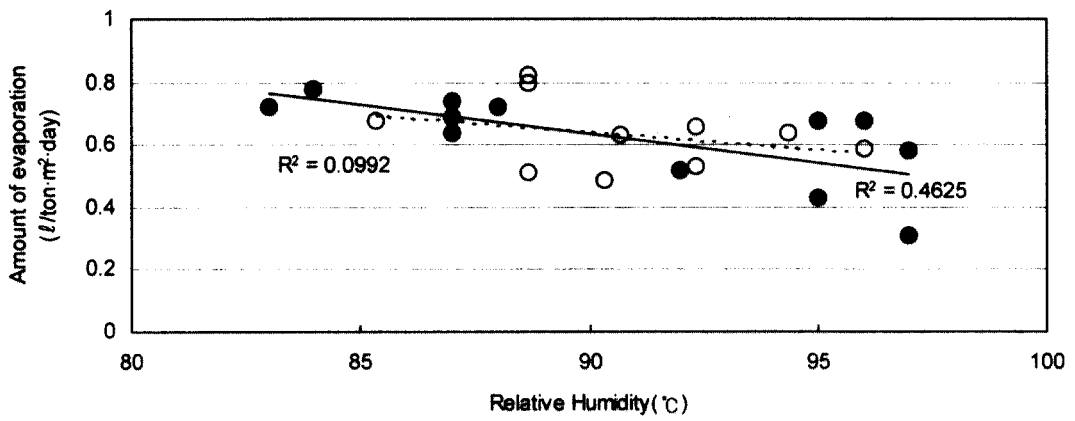
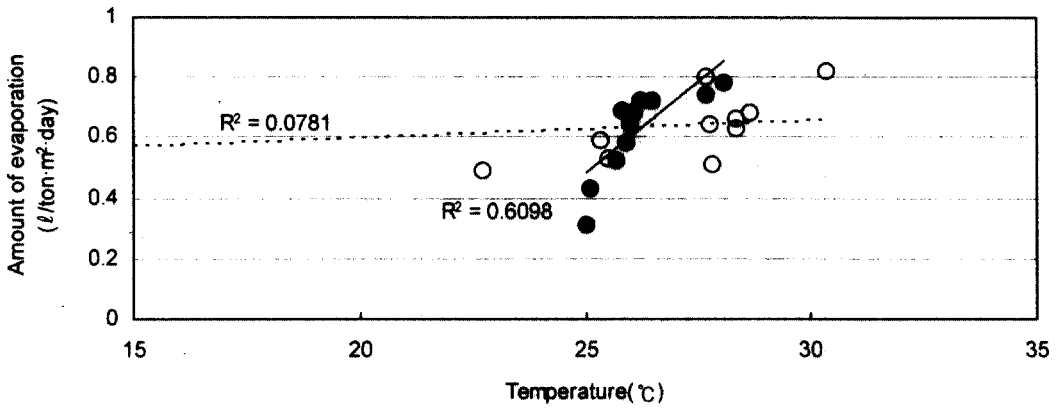


Fig. 7. Change of evaporation rate on swine slurry as spray type(Batch & Flow) on rainy days in summer(June to August).



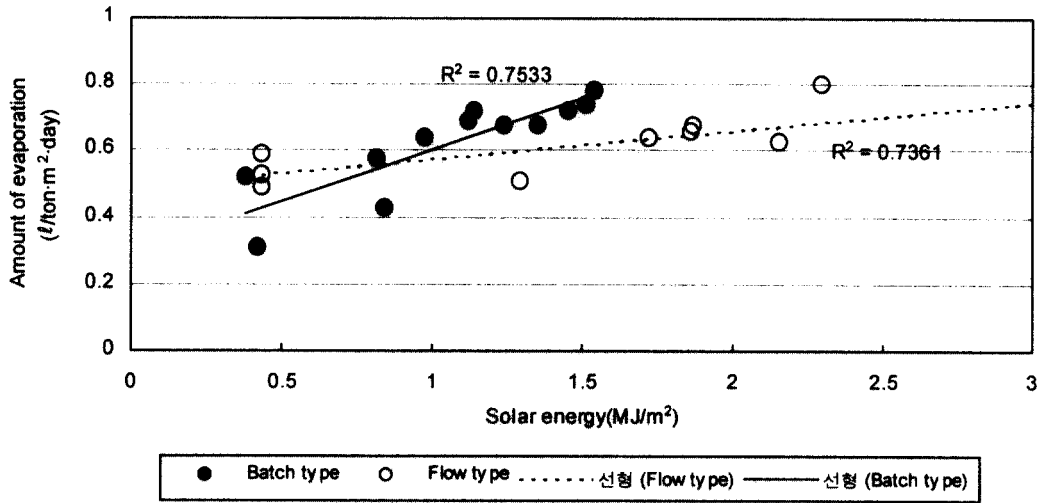


Fig. 8. Correlation of climate condition(Temperature, relative humidity, wind speed, and solar energy) and evaporation rate on swine slurry as spray type(Batch & Flow) on rainy days in summer(June to August).

속 0.8548($p < 0.01$), 일사량 0.7361($p < 0.05$)로 분석되었다. 이러한 결과가 나타나게 된 이유는 乾期 실험시와 마찬가지로 증발상에 영향을 미치는 네 가지 외부 기상요인들이 각각 독립적인 절대적 변수로서 역할을 한 것이 아니라, 상호 복합적으로 동시에 작용했기 때문이라 판단된다. 살포 유형별 네 가지 기상요인의 증발을 상승 기여도를 살펴보면 batch 형태의 경우 풍속 > 일사량 > 온도 > 상대습도, flow 형태의 경우 풍속 > 일사량 > 상대습도 > 온도 順으로 조사되어 두 처리구 모두 대체로 풍속 요인이 증발상 변화에 가장 큰 영향을 준 요인으로 입증되었다. 이러한 분석결과는 증발상에 가장 큰 영향을 주는 요인으로 온도로 분석된 乾期 실험 결과와는 대조되는 것으로 이는 비 오는 날의 경우 시스템 내부로 유입되는 바람의 유속이 급변하는 외부 기상 상황에 편승하여 맑은 날보다는 상대적으로 높았다는 점과 실험 일수가 10일(batch), 12일(flow) 밖에 되지 않아 통계적 분석을 통한 결과 해석이 현실성이 결여된 것으로 사료된다.

3. 여름철 豚슬러리 증발량 분석결과에 대한 고찰

(1) 기상조건(乾期, 雨期) 및 살포유형(batch, flow)에 따른 豚슬러리 증발량 비교

이번 실험에서 雨期는 夏節期(6월~8월)중에 5mm 이상의 강우량을 기록한 날로 설정하였으며 이 기간 중에는 살포방식이 batch 형태로 실험이 진행된 2000년도에는 총 12일, flow 형태로 진행된 2001년도에는 총 10일이 관측되었다. 기상조건 및 살포유형에 따른 豚슬러리 증발량을 비교했을 때 乾期時 평균 증발량은 batch 형태의 경우 $2.71 \text{ l/m}^2 \cdot \text{day}$, flow 형태의 경우 $3.59 \text{ l/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 조사되었으며 雨期時 평균 증발량은 batch 형태 $0.62 \text{ l/m}^2 \cdot \text{day}$, flow 형태 $0.64 \text{ l/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 나타나, 豚슬러리 살포량 1ton 기준 대비 乾期의 경우 약 15.99%, 雨期 3.19% 정도 감량화되는 것으로 분석되었다. 따라서 여름철 雨期에 자연증발시스템 운용시에는 乾期에 비해 저조한 증발율로 나타난 문제점을 보완하기 위해 배풍기 및 배기팬의 작동과 같은 증발 효율제고를 위한 보조시스템이 운전되어야 할 것이라 판단된다. 살포유형에 따른 豚슬러리 증발량 비교 측면에서는 flow 형태의 살포방식이 batch 형태보다 乾期時에는 4.48%, 雨期時에는 0.05% 정도의 증발을 상승 효과가 나타난 것으로 분석되었는데, 이는 다

Table 2. Change of evaporation amount and rate as climate factors and spray type

Spray type	Weather condition	Climate factors (averaged)				A.E. ⁵⁾ ($\ell / \text{ton} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{day}$)	E.R. ⁶⁾ (%)
		Temp. ¹⁾ ($^{\circ}\text{C}$)	R.H. ²⁾ (%)	W.S. ³⁾ (m/sec)	S.E. ⁴⁾ (MJ/m^2)		
Batch (2000)	Clear	32.9	63.6	0.25	14.37	2.71	13.75
	Rainy	26.2	90.7	0.22	1.06	0.62	3.17
Flow (2001)	Clear	31.8	65.6	0.24	11.27	3.59	18.23
	Rainy	27.3	91.2	0.18	1.66	0.64	3.22

ref) 1) Temperature, 2) Relative humidity, 3) Wind speed, 4) Solar energy, 5) Amount of evaporation, 6) Evaporation rate

음과 같이 해석될 수 있다. 자연증발시스템 내부에서 발생하는 증발현상은 살포시豚슬러리 수분입자가 대기 중에 수증기 형태로 전환되는 경우와 살포된 후豚슬러리 수분입자가 바다 여재인 왕겨 표면에서 대기 중으로 휘산되는 경우로 구분할 수 있다. 전자는 시스템 내부의 공기가 포함하고 있는 열량이 살포되는 수분 입자에 전달되어 상 전환(phase conversion)에 의해 수증기로 기화되는 현상이고, 후자는 왕겨여재내 부착된 미생물에 의해豚슬러리가 함유하고 있는 유기물을 분해하면서 발생하는 잠열 및 시스템 내부의 보온 열의 영향과 왕겨여재 표면과 대기 경계면상에서 일어나는 대류현상에 의한 건조 효과로 설명된다. Batch 형태의 경우 하루 중 일사량이 가장 높은 오후 12시에서 1시 사이에 1.5ton의豚슬러리를 한번에 살포했지만 왕겨여재 자체의 수분보유능력(water capacity)을 초과한 나머지 여재 위에豚슬러리가 고이는 현상이 관찰되었으며, 이로 인해 후자에 의한 증발현상이 둔화되고 쉽게 저류조로 유출된 것으로 추정된다. 반면 flow 형태의 경우 1시간 간격으로 2분 살포하고 58분 동안 후자에 의한 증발현상이 일어날 수 있는 적정수준의 투입량과 시간이 주어지는 조건 때문에 batch 형태보다 높은 증발율을 나타낸 것으로 사료되며, 전자에 의한 증발효과보다는 후자에 의한 증발효과가 이번 실험에 적용된 자연증발시스템에 있어서는 더 큰 비율을 차지하고 있음이 규명되었다. 그러므로 2000년도와 2001년도 우리나라 여름철 기후조건이 유사하다는 점

을 고려하면 자연증발시스템 운용시 효율적인豚슬러리 살포는 간헐적이고 연속적인 형태의 flow 방식이 적합하리라 생각된다. 또한 자연증발시스템에서 일어나는 증발현상의 메카니즘을 명확히 밝혀내기 위해서는 왕겨여재 표면 온도와 대기 온도 차이에 따른 열전달 현상 및 왕겨여재에 부착된 종속영양 미생물의 유기물 분해 과정 및 이에 따른 분해열 발생기작 규명을 위한 보완연구가 추후 진행되어야 할 것이라 생각된다.

Fig. 9. Evaporation rate on swine slurry as weather condition and spray type

(2) 자연증발시스템을 통한 한국과 일본의豚슬러리 증발량 비교

2000년과 2001년 두 해에 걸쳐 夏節期(6월~8월)에 수행된 자연증발시스템을 이용한豚슬러리 평균 증발량은 乾期 기준시 batch 형태의 살포방식이 $2.71 \ell / \text{ton} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{day}$, flow 형태의 살포방식의 경우 $3.59 \ell / \text{ton} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{day}$ 를 나타낸 것으로 분석되었다. 일본 지바현 축산센터의 다단계 증발시스템(Seishu, 1994)에 관한 연구

에서 보고된 夏節期 평균 $3.2 \ell / \text{ton} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{day}$ 의 증발량과 비교시 batch 형태의 살포방식으로 관찰된 증발량은 이에 미치지 못하지만, flow 형태의 살포방식으로 자연증발시스템 운용시에는 $0.4 \ell / \text{ton} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{day}$ 정도 향상된 증발효과를 나타냈음이 입증되었다. 이는 증발시스템의 형태보다는 우리와 일본 자바현과의 기상조건의 차이에 기인하는 것으로 추정되며, 기상조건상 日本보다 우리 나라의 자연증발시스템의 정착가능성이 높음을 이해할 필요가 있다. 또한 자연증발시스템의 설계 및 시공의 수월성과 운용 기작의 수월함을 고려한다면, 豚슬러리 증발효과로 인한 잠재적 기대가치는 더 크다고 할 수 있다.

(3) 자연증발시스템 운용에 따른 경제적 가치

실험에 사용된 자연증발시스템을 fan 사용 전제시 하루 6시간 동안 운용한다는 가정하에 소요되는 전력소비를 현재 우리 나라 농업용 한달 전력요금 기준으로 대략 20,318원으로 산출된다. 이는 夏節期 乾期시 豚슬러리 증발효과 향상을 위해 설치된 배풍기와 배기팬 작동이 중단되더라도, 높은 기온 및 일사량 효과에 의해 발생하는 자연에너지를 충분히 활용할 수 있기 때문에 상응하는 豚슬러리 감량효과를 기대할 수 있게 된다. 따라서 약 10,000원 가량의 운용 비용이 절약되어 총 처리비용의 절반 가량을 줄일 수 있는 상당한 경제적 이익을 도모할 수 있으리라 추정된다.

4. 수학적 모형 및 통계적 분석을 통한 여름철 乾期와 雨期시 자연증발량 추정

(1) 수학적 모형을 통한 자연증발량 추정
증발량에 영향을 미치는 인자로서 유입공기의 온도, 상대습도 그리고 풍속 및 태양복사열(일사량)의 여러 요인들을 조합하여 최적의 조건범위를 결정하고자 하였다. 온도와 습도, 유입공기의 속도는 실험 당일날의 기후조건에 의하였으며 공급 유입량인 豚슬러리는 1톤을 기준으로 설정하였다. 증발량 산출을 위해 물질 전달법에 근거한 Dalton형의 증발식(강 등, 1993)은 다음과 같다.

$$E_h = (0.0178 + 0.0152V) \times (H_w - H_a) \quad (4)$$

Dalton형의 증발식에 의해 구한 영역과 실험에서 실제로 구한 영역을 비교했을 때 상대적으로 많은 차이가 나타나 실질적인 실험식을 도출하고자 하였다. H_w (포화증기압)는 본 실험에서 측정된 온도를 가지고 식(5)를 이용하여 산출하였으며, H_a (실제증기압)는 식(5)로부터 산출된 H_w 와 실험에서 측정된 상대습도를 가지고 식(6)에 의해 구하였다.

$$\ln(H_w) = A_1/T + A_2 + A_3T + A_4T^2 + A_5T^3 + A_6T^4 + A_7 \ln(T) \quad (5)$$

여기서, H_w : 포화증기압, mm Hg
 T : 온도, Kelvin
 A : 상수, Constant

$$\Psi = H_a / H_w \quad (6)$$

여기서, Ψ : 상대습도
 H_a : 실제증기압, mmHg
 H_w : 포화증기압, mmHg

Table 3. Estimation of evaporation rate on swine slurry applying vapor pressure

Spray type	Weather condition	Estimated equation as the mathematical model
Batch	Clear	$E^{1)} = (0.0025 + 0.0068V) \times (H_w^{2)} - H_a^{3)}$
	Rainy	$E = (0.0006 + 0.0019V) \times (H_w - H_a)$
Flow	Clear	$E = (0.0037 + 0.0075V) \times (H_w - H_a)$
	Rainy	$E = (0.0005 + 0.002V) \times (H_w - H_a)$

ref) 1) E : evaporation rate($\ell / \text{ton} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{day}$), 2) H_w : saturated vapor pressure(mmHg)
 3) H_a : practical vapor pressure(mmHg)

Table 3. Relationship between bacterial log count(35°C/48hr) and resazurin reduction time from blue color to reduction color at 25°C, 30°C or 35°C, respectively

RRT method		Sample number	Regression equation	Correlation coefficient	Detection time(hr)		
Temp.	Reduction color				Y=2	Y=3	Y=4
25°C	청자색	82	$Y = -0.3501X + 4.8414$	-0.39	8.1	5.3	2.4
	보라색	81	$Y = -0.2467X + 5.4597$	-0.68	14.0	10.0	5.9
	분홍색	84	$Y = -0.2484X + 6.3039$	-0.85	17.3	13.3	9.3
30°C	청자색	124	$Y = -0.3688X + 4.8183$	-0.47	7.6	4.9	2.2
	보라색	124	$Y = -0.3618X + 5.7722$	-0.77	10.4	7.7	4.9
	분홍색	126	$Y = -0.3514X + 6.7513$	-0.93	13.5	10.7	7.8
35°C	청자색	124	$Y = -0.3799X + 4.6782$	-0.36	7.0	4.4	1.8
	보라색	125	$Y = -0.4741X + 5.8763$	-0.71	8.2	6.1	4.0
	분홍색	127	$Y = -0.3583X + 6.4509$	-0.76	12.4	9.6	6.8

주) Y = Initial bacterial log count, X = Reduction time from blue color to reduction color.

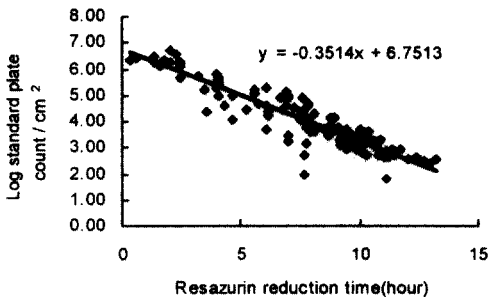


Fig. 3. Scatter diagram and regression line showing the relationship between bacterial log count(35°C/48hr) and resazurin reduction time from blue color to pink color at 30°C.

각 10.4시간, 7.7시간, 4.9시간이었으며, 청색에서 분홍색으로 환원되는 시간은 각각 13.5시간, 10.7시간, 7.8시간이었다. 35°C로 배양하면서 분홍색으로 환원되는 시간과의 상관계수($r = -0.76$)와 30°C로 배양하면서 분홍색으로 환원되는 시간과의 상관계수($r = -0.93$)는 Losonczy와 Incze(1969)가 돼지고기를 대상으로 SPC(37°C/24hr)와 RRT법을 이용하여 37°C로 배양하면서 분홍색으로 환원되는 시간과의 상관계수가 $-0.749(n=37)$ 이었다고 한 결과와 비교했을 때 35°C는 비슷한 반면 30°C는 높은 상관성을 보임에 따라서 레자주린 배양온도에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

표 1~표 3을 종합해 볼 때 Werlein(1996)이 bioluminescence법으로 우도체의 표면 미생물수를 측정했을 때 SPC법과의 상관계수(r)가 0.95

이었다는 보고와 유사한 반면 Steigert와 Kirschner(1997)는 0.71이었다는 보고보다는 상관관계가 높게 나왔다. 또한 Pless와 Reisinger(1995)는 Bactrac 4100 impedance 법으로 260개 시료에 대해 SPC법과의 상관계수(r)가 $-0.83 \sim -0.87$ 이었다는 보고보다 높은 상관성을 보였으며, 검사시간은 10^4 cfu/cm²일 경우 9.6시간, 10^6 cfu/cm²일 경우 4.2시간 소요되었다고 한 결과보다 검사시간이 단축되었다.

이와같이 온도간에는 상관계수가 30°C, 25°C, 35°C 순이었고, 환원색간에는 분홍색, 보라색, 청자색 순으로 상관계수가 높았으며, 검사시간은 35°C, 30°C, 25°C 순으로 짧았다.

이를 토대로 상관계수와 검사시간을 감안할 때 30°C에서 분홍색으로 환원되는 시간이 가장 적합한 것으로 나타났다.

따라서 신속검사법으로는 30°C에서 분홍색으로 환원되는 시간이 외국의 신속세균검사기와 비교해볼 때 자동방법은 아니지만 상관계수가 비슷하거나 높고, 검사시간이 단축되었으며, 검사비용이 시료당 거의 들지 않는 장점이 있어 대체 가능한 것으로 나타났다.

IV. 요 약

본 연구는 실험방법이 간단하고 분석비용이 저렴하며, 단시간내에 세균수를 측정할 수 있는 현장적용 가능한 방법을 확립하기 위하여 냉장우육의 총균수를 표준평판배양법과 배양온도를 25°C, 30°C, 35°C 별로 레자주린 환원색과

환원시간을 측정하여 상관관계를 산출하였다.

연구결과를 보면, 총균수(25℃/72시간, Y)와 레자주린 환원시간(X)과의 상관계수는 RRT (Resazurin reduction test) 배양온도가 25℃와 30℃, 환원색은 청색에서 분홍색으로 변할 때가 각각 -0.95와 -0.94로서 가장 높았다. 상관계수와 환원시간을 감안할 때 RRT 배양온도는 30℃가 적합하였으며, 이때 회귀방정식은 $Y = -0.4386X + 7.7870$ 이었으며, 돼지고기의 총균수가 10^2 , 10^3 , 10^4 cfu/cm²일 경우 검사시간은 13.2시간, 10.9시간, 8.6시간이었다. 총균수(30℃/72시간, Y)와 레자주린 환원시간(X)과의 상관계수는 RRT 배양온도가 30℃, 환원색은 청색에서 분홍색으로 변할 때가 -0.93으로서 가장 높았다. 이때 회귀방정식은 $Y = -0.4171X + 7.5540$ 이었으며, 돼지고기의 총균수가 10^2 , 10^3 , 10^4 cfu/cm²일 경우 검사시간은 13.3시간, 10.9시간, 8.5시간이었다. 총균수(35℃/48시간, Y)와 레자주린 환원시간(X)과의 상관계수는 RRT 배양온도가 30℃, 환원색은 청색에서 분홍색으로 변할 때가 -0.93으로서 가장 높았다. 이때 회귀방정식은 $Y = -0.3514X + 6.7513$ 이었으며, 돼지고기의 총균수가 10^2 , 10^3 , 10^4 cfu/cm²일 경우 검사시간은 13.5시간, 10.7시간, 7.8시간이었다.

V. 사 사

본 연구는 1999년도 농림부 농림기술개발사업에 의해 수행된 결과의 일부이며 지원에 감사드립니다.

VI. 인 용 문 헌

1. 축산물의 가공기준 및 성분규격. 1998. 농림부.
2. Chen, H. C., Ding, H. C. and Chang, T. C. 1993. Impedance based method for the rapid enumeration of total aerobic bacterial load of pork hamburger and its raw materials. J. the Chinese Agricultural Chemical Society 31(3):351.
3. Dodsworth, P. J. and Kempton, A. G. 1977. Rapid measurement of meat quality by resazurin reduction II. Industrial Application. J. Inst. Can. Sci. Technol. Aliment. 10:158.
4. Edmondson, J. E., Golden, R. and Wedle, D. B. 1985. Reduction Methods. In Standard Methods for the Examination of Dairy Products, 15th Ed. pp.259-264, American Public Health Association, Washington, D. C.
5. Ingram, M. and Simonsen, B. 1980. Meat and meat products. In: Microbial Ecology of Foods, Vol 2. Food commodities, pp. 333-409, Academic Press, New York.
6. ISO. 1988. Meat and meat products-enumeration of microorganism-colony count technique at 30℃ (reference method). ISO 2293, 2nd edition. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
7. Kroll, R. G. 1989. Dye reduction and other colorimetric methods for the assessment of microbial contamination. In Rapid Methods in Food Microbiology, M. R. Adams, and C. F. A. Hope, (Ed.), p.191-237. Elsevier Publ. Amsterdam.
8. Losonczy, M. and Incze, K. 1969. Rapid method for estimation of microbiological quality of meat and meat products. Proceedings of the European Meeting of meat - research - workers; 15:118 (summ III) 31.
9. Luck, H. 1982. Reduction tests for the determination of the bacteriological quality of raw milk. Kieler Milchwirt. Forschung. 132:1789.
10. Orth, R. and Steigert, M. 1996. Practical experience in the ATP-bioluminescence measuring technique to control hygiene after cleaning of a meat plant. Fleischwirtschaft. 76(1):40.
11. Pless, P. and Reisinger, T. 1995. Using the impedance splitting method for quick determination of the surface bacterial count on carcasses. Fleischwirtschaft. 75(9):1149.
12. Steigert, M. and Kirschner, T. 1997. Practical application of the bioluminescence method. Acceptance checking, using a meat cutting factory as an example. Fleischwirtschaft. 77(5):412.
13. Venkitanarayanan, K. S., Faustman, C., Hoagland, T. and Berry, B. W. 1997. Estimation of spoilage bacteria load on meat by fluorescein diacetate hydrolysis or resazurin reduction. J. Food Science. 62(3):601.
14. Webbs, N. B., Thomas, F. B., Busta, F. F. and Kerr, L. S. 1972. Evaluation of scallop meat quality by the resazurin reduction technique. J. Milk Food Technol. 35:664.
15. Werlein, H. D. 1996. Determination of the microbial load on pork and beef carcasses by means of the bioluminescence method. Fleischwirtschaft. 76(2):179.
16. Werlein, H. D. and Fricke, R. 1996. ATP bioluminescence for rapid determination of the microbiological quality of poultry meat. Archiv fuer Gefluegelkunde. 60(5):212.

(접수일자 : 2002. 7. 3 / 채택일자 : 2002. 8. 9)