

냉각 제습에 의한 음식물 쓰레기 처리장치 악취제거에 관한 실험적 연구

A Study on an experimental basis a use deodorize stink of food-waste in order to cooling dehumidification

박일수 · 김재돌

I. S. Park and J. D. Kim

Key Words : Deodorizer(탈취탑), Dehumidifier(제습기), Instrumental Analysis Method(기기분석법), Stink Ingredient(악취성분), VOC(휘발성유기화합물)

Abstract : This paper presents an effective cooling dehumidification method to remove odorous gas from food-wastes. The odorous gases, such as Styrene, Ammonia, Hydrogen sulfide and Acetaldehyde, are produced in environments where temperature is 50~80°C and humidity is 40~70%. Under such conditions, experiments are performed reiteratively using experiment equipments. The effect of the cooling dehumidification is measured via measuring instrument, and this research is focused on improving efficiency. The effect of cooling dehumidification using measuring instrument is validated. At 80°C, four type of gases that was mentioned previously showed generally better cooling efficiency with a good result for a component concentration. Among them, hydrogen sulfide gas demonstrated the highest reduction of 50%.

기호설명

- $C_{p,r}$: 비열 (kJ/kg · K)
- μ : 점도 (Pa · s)
- k : 열전도도 (W/m · K)
- ρ : 밀도 (kg/m³)
- $t_{w,i}$: 입구온도 (°C)
- $t_{w,o}$: 출구온도 (°C)

1. 서 론

산업단지내의 공장, 오폐수처리공장, 분뇨처리장, 동물축사, 쓰레기 처리시설에 발생하는 악취는 작업장내의 근로자뿐만 아니라 인근 주민들에게도 불쾌감을 줄 뿐만 아니라 인체에 유해한 물질을 배출한다. 현재 국내에서는 황화수소(H₂S), 메틸메르캅탄(CH₃SH), 암모니아(NH₃), 황화메탈, 이황화메탈, 트리메탈아미, 아세트알데히드, 스티렌 등 8가지 항목

에 대해서 규제되고 있지만, 실제 사람이 느낄 수 있는 악취는 40여만 가지의 물질이며 농도에 따라 불쾌감을 느낄 수 있다¹⁾.

전국적으로 발생하는 생활 쓰레기는 하루에 약 5만ton이며 그중 30%가 음식물 쓰레기이나 음식물 쓰레기의 약 2%만이 재활용 되고 95%가 매립되고 있어, 음식물 재활용은 향후 넘쳐나는 오염물질의 재생을 위한 기초적인 단계로 국내는 물론 외국에서도 가장 시급히 처리해야할 문제로서 처리과정의 악취제거 방법에 대한 관심이 점차 커지고 있는 실정이다²⁾. 악취는 황화수소, 메르캅탄류, 아민류 및 기타 자극성 있는 기체상 물질이 사람의 냄새감각을 자극하여 불쾌감과 혐오감을 주는 냄새로 정의되며 소음이나 진동과 함께 감각오염이라 불리는 대기 환경오염의 한 형태로 볼 수 있다^{3, 4)}.

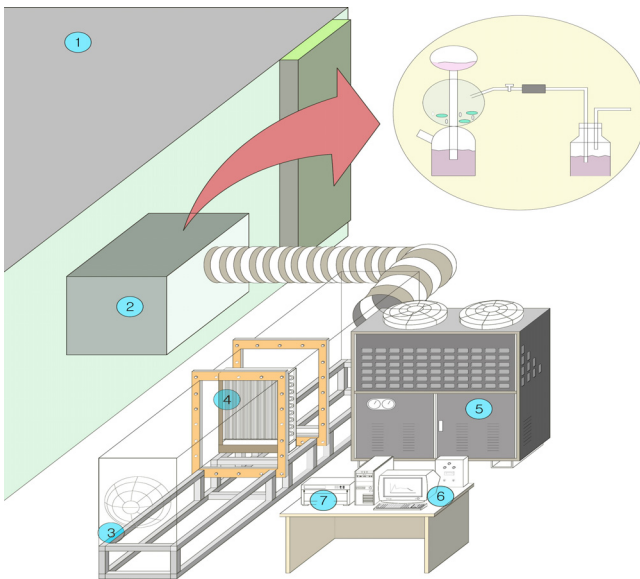
따라서 음식물의 분해과정에서 발생하는 악취가스에 포함된 수증기를 강제송풍에 의한 제습장치로 송풍시켜 수분을 제거시키고, 수분이 제거 된 가스는 바이오 필터와 상부에서는 열 소각방식을 통과하면서 악취제거의 효율을 높일 수 있다고 볼 수 있다. 또한 기존에 사용되고 있는 탈취탑의 건풍건조방식을 이용하여 개발비 및 시설비의 절감효과와

접수일 : 2007년 10월 11일, 채택확정 : 2008년 1월 24일
박일수(책임저자) : 동명대학교 공과대학 환경설비공학과
E-mail : pis@tu.ac.kr, Tel : 051-620-3417
김재돌 : 동명대학교 공과대학 환경설비공학과

처리방법의 단순화를 통하여 처리비용을 줄일 수 있는 장치를 개발하고자 현재 사용되고 있는 탈취탑의 모델을 축소 적용하여 실험적 방법을 통하여 본 연구를 진행하였다.

2. 냉각식 제습장치 시스템

냉각식 제습방법은 공기를 노점온도 이하로 냉각하기 위해 통상 냉동기를 사용하고, 일반적으로 공기계통과 냉각계통 두 시스템으로 운전된다. 하지만, 냉동기로 냉매를 열교환기에 보낼 때 감온 팽창면만으로 냉각부하를 제어하면 경부하시에 증발온도가 저하되어 열교환기 내에 응축수착상 동결이 일어나는 것을 방지하기 위해 Hot gas by-pass 방식으로 흡입압력을 제어해 주어야 한다. 증발 압력 조절변(EPR)은 열교환기가 1조일 때는 냉동기 흡입 압력의 변동이 크고, 경부하시에는 저압 스위치로 on-off를 반복하기 때문에 냉동기 연속가동에는 Hot gas by-pass방식이 선호된다.



1. Chamber 2. Air Pollution Apparatus 3. Pan Unit
4. Heat Exchanger Unit 5. Refrigerator Unit
6. Computer Analysis 7. Data Logger

Fig. 1 Experimental apparatus

또한, 처리 풍량이 많고 냉각부하가 커서 소형 냉동기의 사양 범위를 초과하면 열교환기를 직접식이 아닌 Brain cooling type으로 하는 것이 유리하다. 이러한 다양한 방식 중에서 악취 성분을 가진 수증기를 냉각시키기 위한 냉동기를 설계하였다.

Fig. 1은 실제 적용된 실험장치의 구성도를 나타내고 있다. 실험장치 구성은 챔버내에서 오염공기 발생기로부터 각 물질의 오염농도 요구 수준을 생성시켜 팬으로부터 강제적으로 배출할 수 있도록 장치를 구성하였으며 음식물쓰레기의 4대 악취가스 성분인 스티렌, 암모니아, 황화수소, 아세트알데히드에 대하여 실험을 하였으며 각 성분을 감지할 수 있는 성분분석기를 냉각 제습기의 통과하기 전과 통과한 후의 성분분석기로부터 받은 검출량을 컴퓨터에 데이터를 전송하여 측정을 반복적으로 수행하였다. 오염공기 성분의 농도(PPM)는 환경오염 기준의 이상인 조건에서 생성시켰으며 온도 50~80℃, 습도는 40~70%(실제 음식물쓰레기의 온도, 습도 조건)의 생성조건 분위기(Chamber Display Pannel 표시)를 만족하였을 때 챔버개구부를 열어 강제 송풍방식으로 배출시켰다.

3. 실험장치 설계

3.1 냉각 제습장치부

냉각식 제습 설계 장치를 설계하기 위하여 각 열교환기의 설계는 다음과정으로 진행하였다.

(1) 설계조건

- 1) 열교환기 : 평활관
- 2) 응축기 용량 Q_e : 3RT급 (10.1kW)
- 3) 냉매(R-290)
 - 응축기 입구 냉매 온도 : 70℃
 - 응축기 출구 냉매 온도 : 40℃

R-290의 평균 물성치 (평균 온도인 55℃에서 포화액과 포화증기의 평균값 선택)

- 비열 $C_{p,r}$ = 2.938 kJ/kg · K
- 점도 μ = 39.66×10⁻⁶ Pa · s
- 열전도도 k = 0.0516 W/m · K
- 밀도 ρ = 241.00 kg/m³

4) 이차유체(물)

입구온도 $t_{w,i}$ = 32℃

출구온도 $t_{w,o}$ = 37℃

이차유체의 평균 물성치

- 비열 $C_{p,w}$ = 4.224 kJ/kg · K
- 점도 μ = 0.0007 Pa · s
- 열전도도 k = 0.624 W/m · K

(2) 대수평균온도차 (LMTD)

$$\Delta T_{lmtd} = \frac{(T_{r,i} - T_{w,o}) - (T_{r,o} - T_{w,i})}{\ln[(T_{r,i} - T_{w,o}) / (T_{r,o} - T_{w,i})]} = \frac{(70 - 37) - (40 - 32)}{\ln[(70 - 37) / (40 - 32)]} = 17.64$$

(3) Double Pipe의 선정

이중관식 열교환기 설계에서 11/4B×1/4B로 하면,

- 1) 외관외경 (D_o) = 28.58 mm
외관내경 (D_i) = 25.28 mm
- 2) 내관외경 (d_o) = 12.7 mm
내관내경 (d_i) = 10.22 mm
- 3) 내관면적 (A_i) = 81.99 mm²
환상부면적 = 496.92 mm²
- 4) 환상부 상당 직경 (D_e) = $D_i - d_o = 25.28 - 12.7 = 12.58$ mm

(4) 냉매와 이차유체의 유량계산

1) 냉매측

냉매측 유량은 증발기측에서 구한 유량과 동일하게 적용한다.

$$m_r = 0.0203 \text{ [kg/s]}$$

2) 이차유체측

$$Q_s = m_w c_{p,w} \Delta T_w \quad (1)$$

$$m_w = \frac{Q_w}{c_{p,w} \Delta T_w} = \frac{10.1}{4.224 \times (37.32)} = 0.478 \text{ [kg/s]} \quad (2)$$

(5) 이차유체 유속

1) 유로면적

$$A_w = \frac{\pi \times (D_i^2 - d_o^2)}{4} = \frac{\pi \times (25.28^2 - 12.7^2)}{4} = 375.06 \text{ mm}^2 \quad (3)$$

2) 질량속도

$$G_w = \frac{m_w}{A_w} = \frac{0.478}{375.06} = 1275.05 \text{ kg/m}^2 \text{ s} \quad (4)$$

3) 유체속도

$$V_w = \frac{G_w}{\rho} = \frac{1275.05}{1000} = 1.28 \text{ m/s} \quad (5)$$

(6) 냉매 유속

1) 유로면적

$$A_r = \frac{\pi \times d_i^2}{4} = \frac{\pi \times 10.22^2}{4} = 81.99 \text{ mm}^2 \quad (6)$$

2) 질량속도

$$G_r = \frac{m_r}{A_r} = \frac{0.0203}{81.99} = 247.59 \text{ kg/m}^2 \text{ s} \quad (7)$$

3) 유체속도

$$V_r = \frac{G_r}{\rho} = \frac{247.59}{241.00} = 1.02 \text{ m/s} \quad (8)$$

(7) 냉매측 증발열전달계수

관내측을 흐르는 냉매의 레이놀즈수(Re)는 아래

와 같다. Kandlikar가 제안한 수평관에서의 유체 비 등에 대한 상관식을 적용한다.

$$Re_r = \frac{4m_r}{\pi d_i \mu_i} = \frac{4 \times 0.0203}{\pi \times 0.01022 \times 39.66 \times 10^{-6}} = 63767.96 \quad (9)$$

응축 열전달계수를 구하기 위한 상관식으로 Cavallini-Zecchin이 제안한 식을 적용한다. Cavallini-Zecchin의 상관식은 작동유체로써 R-11, R-12, R-21, R-22, R-113, 그리고 R-114를 포함한 몇 가지 냉매를 사용하여 간단한 형태이면서 비교적 일반성이 있는 상관식을 증명하였다. Cavallini-Zecchin은 냉매의 수평 및 수직 하향류의 관내 높은 증기유속시의 응축에 대하여 상당 Reynolds수를 이용한 국소 응축열전달계수 예측식을 제안하였는데, 이 상관식의 기본 형태는 Traviss 등의 상관식에서 사용된 것과 유사한 이론적인 분석에 의해서 제시되었다.

Cavallini-Zecchin에 의해 제시된 2상류 열전달 계수 h_{TP} [kW/m²·K]의 상관식은 다음과 같다.

$$h_{TP} = 0.05 Re_{eq}^{0.8} Pr_i^{0.33} \frac{k_i}{d_i} \quad (10)$$

$$= 0.05 \times 75917.46^{0.8} \times 2.83^{0.33} \times \frac{0.07882}{0.01022} = 4360.32 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$$

여기서, Pr_i 은 액체 Prandtl 수, k_i 는 액체 열전도율 [kW/m·K], d_i 는 관 내경 [m]이며, Re_{eq} 는 상당 Reynolds 수이다.

$$Pr_i = \frac{C_{pi} \times \mu_i}{k_i} = \frac{3236 \times 69.06 \times 10^{-6}}{0.07882} = 2.83 \quad (11)$$

$$Re_{eq} = G_{eq} \cdot d_{LN} / \mu_L = 513.00 \times 0.01022 / 69.06 \times 10^{-6} = 75917.46$$

$$G_{eq} = G_r \cdot [(1-x) + x(\rho_l/\rho_v)^{1/2}] = 247.59 \times [(1-x) + x(438.2/43.81)^{1/2}] = 513.00 \text{ kg/m}^2 \text{ s} \quad (12)$$

여기서, G_{eq} 는 상당질량유속이다. μ_l 는 액체의 점도 [Pa·s], ρ_l 는 액체의 밀도 [kg/m³], μ_v 와 ρ_v 는 각각 증기의 점도 [Pa·s]와 밀도 [kg/m³]를 나타낸 것이다.

(8) 이차유체측 열전달계수

이차유체측의 레이놀즈수는 다음과 같다.

$$Re_w = \frac{D_e \times G_w}{\mu} = \frac{0.01258 \times 1275.05}{0.0007} = 22914.47 \quad (13)$$

$$Pr = \frac{C_p \times \mu}{k} = \frac{4224 \times 0.0007}{0.624} = 4.74 \quad (14)$$

레이놀즈수 $Re > 10,000$ 이고, $0.7 \leq Pr \leq 160$ 의 범위에 해당되므로 Dittus-Boelter 식을 이용하여 이체 유체층의 열전달계수를 구하면,

$$h_w = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.3} \times k / D_e = 0.023 \times 22914.47^{0.8} \times 4.74^{0.3} \times 0.624 / 0.01258 = 5598.26 \text{ W/m}^2\text{K}$$

(9) 총괄열통과율 계산

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_c}{A_i} + \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi\kappa L} + \frac{R_r}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (16)$$

에서 오염계수와 관을 통한 전도항을 무시하면,

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_r} + \frac{1}{h_w} \frac{d_o}{d_i}} = \frac{1}{\frac{1}{4360.32} + \frac{1}{5598.26} \frac{0.0127}{0.01022}} = 2215.82 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (17)$$

(10) 열교환기 길이 계산

소요전열면적 A는

$$A = Q / U \times \Delta T_m = 10100 / 2215.82 \times 17.64 = 0.258 \text{ m}^2 \quad (18)$$

$$L = \frac{A}{\pi d_o} = \frac{0.258}{\pi \times 0.0127} = 6.47 \text{ m} \quad (19)$$

3.2 Sensor 분석부

실험조건은 온도 50 ~ 80°C, 습도 40 ~ 70%, 매 10분 단위로 1시간의 시간 중에서 6번을 측정을 실시하였다. 센서 계측은 제습장치의 효율성이 분기술개발과제의 가장 핵심적인 요소이므로 제습장치 통과 전과 통과 후의 비교 계측을 실시하였다. 또한, 데이터의 신뢰성을 확보하기 위하여 각각 10번의 반복실험을 수행하였으며 실험 결과에 언급된 그림은 평균값을 산출하여 나타내었다.

4. 실험 결과

음식물쓰레기의 악취성분 8대 성분 중 현재 실험이 가능한 스티렌, 암모니아, 황화수소, 아세트알데히드의 4가지 성분을 습도조건(40~70%)에 따라 실험결과를 분석한 자료이다. 제습장치 특성상 습도에 가장 영향을 줄 수 있기 때문에 분석조건 계획을 수립하였다. Fig. 2는 악취성분인 스티렌을 기준으로 실험한 결과이다.

투입 용액은 약 3 ppm으로서 환경오염 기준인 2 ppm을 상이 하는 농도를 투입하였으며, 습도는 40%를 유지 하도록 실험하였다.

실험결과 3 ppm이었던 스티렌이 약 30분 후 기준치인 2 ppm이하로 낮아 졌으며, 약 한 시간 후에는

약 1.75 ppm정도로 낮아 졌다. 약 35%정도의 감소 효과가 있었으며, 입구 온도가 높을수록 그 효율이 더 좋게 나타났다.

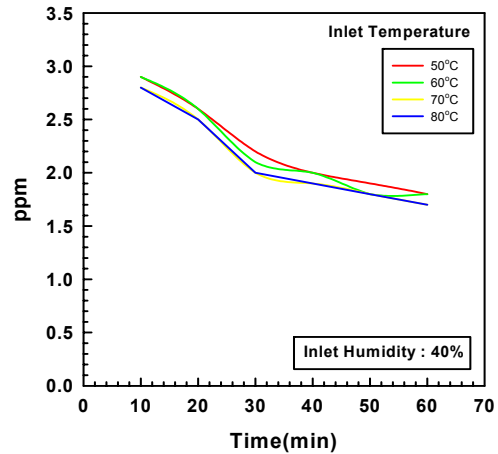


Fig. 2 Styrene experimental data (inlet humidity 40%)

Fig. 3은 악취성분 중의 메스꺼움을 발생시키는 암모니아를 기준으로 실험한 결과이다.

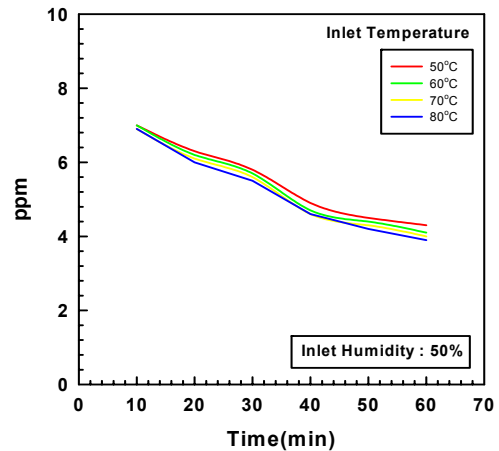


Fig. 3 Ammonia experimental data (inlet humidity 50%)

상기 실험의 조건은 입구 투입 용액 약 7 ppm으로서 환경오염 기준인 5 ppm을 상이 하는 농도를 투입하였으며, 습도는 50%를 유지 하도록 실험하였다. 실험결과 7 ppm이었던 암모니아가 약 40분 후 기준치인 5 ppm이하로 낮아 졌으며, 약 한 시간 후에는 약 4.1 ppm정도로 낮아 졌다. 약 42%정도의 감소 효과가 있었으며, 입구 온도가 높을수록 그 효율이 더 좋게 나타났다. 입구 공기 습도가 40%보다 좀 더 많은 응축수를 획득할 수 있었다.

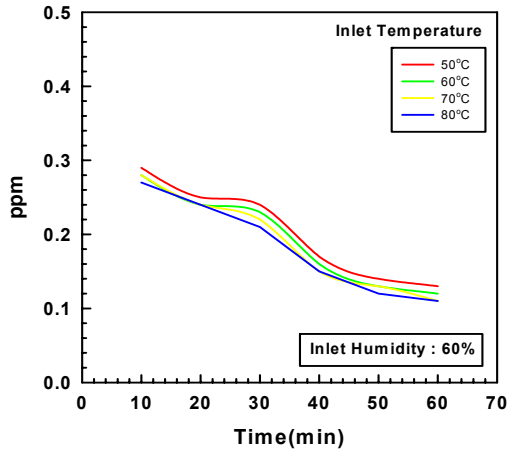


Fig. 4 Hydrogen experimental data (inlet humidity 60%)

Fig. 4는 악취요인 중의 한 성분인 황화수소를 기준으로 실험한 결과이다.

상기 실험의 조건은 입구 투입 용액 약 0.3 ppm 으로서 환경오염 기준인 0.2 ppm을 상이 하는 농도를 투입하였으며, 습도는 60%를 유지 하도록 실험 하였다. 실험결과 0.3 ppm이었던 황화수소가 약 33 분 후 기준치인 0.2 ppm이하로 낮아 졌으며, 약 한 시간 후에는 약 0.12 ppm정도로 낮아 졌다.

약 60%정도의 감소 효과가 있었으며, 입구 온도가 높을수록 그 효율이 더 좋게 나타났다. 입구 공기 습도가 50%보다 좀 더 많은 응축수를 획득할 수 있었다.

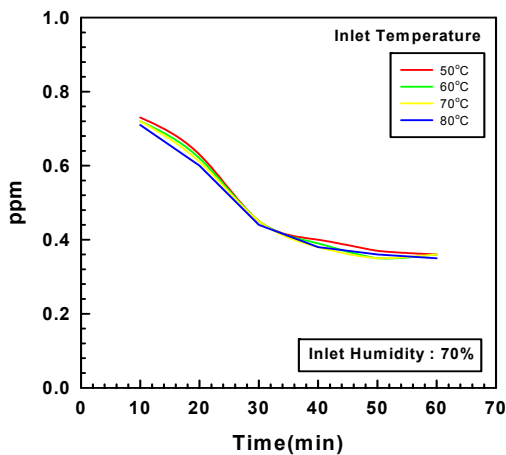


Fig. 5 Acetaldehyde experimental data (inlet humidity 70%)

Fig. 5는 악취요인중의 한 성분인 아세트알데히드를 기준으로 실험한 결과이다.

상기 실험의 조건은 입구 투입 용액 약 0.8 ppm 으로서 환경오염 기준인 0.5 ppm을 상이 하는 농도

를 투입하였으며, 습도는 70%를 유지 하도록 실험 하였다. 실험결과 0.8 ppm이었던 아세트알데히드가 약 27분 후 기준치인 0.5 ppm이하로 낮아 졌으며, 약 한 시간 후에는 약 0.36 ppm정도로 낮아 졌다.

약 58%정도의 감소 효과가 있었으며, 입구 온도가 높을수록 그 효율이 더 좋게 나타났다. 입구 공기 습도가 60%보다 좀 더 많은 응축수를 획득할 수 있었다.

다음의 분석한 결과 자료는 악취성분이 현재 농도의 양에 의한 것을 법적 기준으로 삼고 있다. 그리하여 기준 농도인 PPM 단위별로 습도와 온도조건의 변화에 의해 분석한 결과 자료이다.

Fig. 6은 암모니아를 대상으로 실험한 결과이다. 입구 측 공기의 상태를 5가지 조건의 습도와 4가지 온도를 기준으로 실험하였으며, 암모니아의 농도는 7 ppm을 기준으로 실험하였다. 습도가 높아질수록 분포가 광범위 하게 나타났으며, 온도가 높을수록 출구 공기의 ppm이 더 낮게 나타났다.

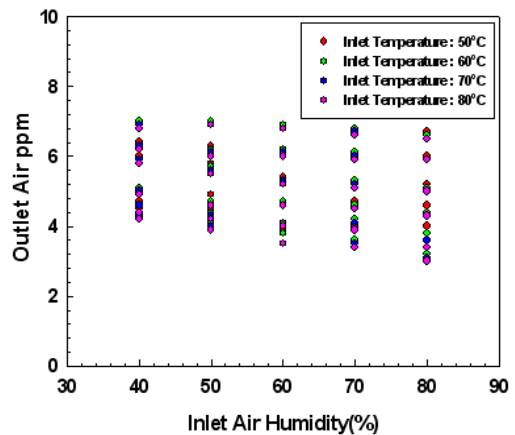


Fig. 6 Ammonia analysis data in the inlet air humidity of outlet air PPM

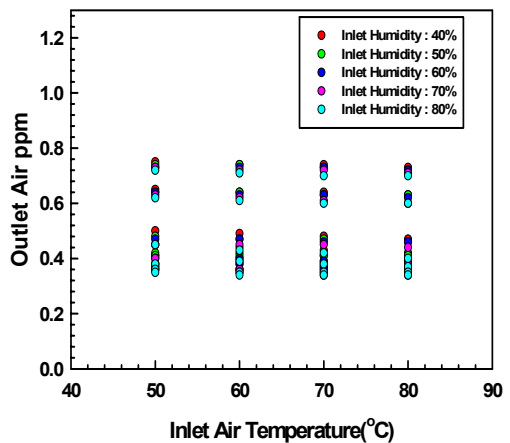


Fig. 7 Acetaldehyde analysis data in the inlet air humidity of outlet air PPM

다음의 분석한 결과 자료는 악취성분이 기존의 분석된 데이터를 습도조건 40~80%까지의 변화에 따라 4단계 온도조건인 50~80℃의 상관관계와 특성을 알아보기 위하여 분석한 결과 자료이다.

Fig. 7은 아세트알데히드를 대상으로 실험한 결과이다. 입구 측 공기의 상태를 5가지 조건의 습도와 4가지 온도를 기준으로 실험하였으며, 황화수소 농도는 0.8 ppm을 기준으로 실험하였다.

실험 직후에는 각 습도별로 차이는 있으나, 많은 변화를 보이지 않았으며 낮은 쪽으로 많은 분포도가 형성되어 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

냉각 제습에 의한 음식물쓰레기의 처리장치 악취 제거에 관한 실험적 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 스티렌, 암모니아, 황화수소, 아세트알데히드의 4가지의 성분들은 대체로 온도영역 80℃일 때 냉각 효율이 더욱 좋았으며 성분농도도 좋은 결과를 얻었다. 그 중 황화수소가 가장 높은 50%의 감소효과를 볼 수 있었다.
2. 암모니아와 아세트알데히드의 습도조건 40 ~ 80%까지의 변화에 따라 4단계 온도조건인 50 ~ 80℃의 상관관계와 특성을 알아보기 위하여 분석한 결과 온도가 높은 영역(80℃)에서 성분농도의 감소가 빨리 진행되는 것으로 확인하였다.
3. 이상과 같은 실험에서 음식물쓰레기의 악취성분을 제거하는데 냉각 제습방식이 탁월한 효과를 보인다는 것은 확인하였다.

참고문헌

1. 박일수, 김재돌, 2005, “거용 탈취탑 고효율을 위한 제습장치 개발”, 동명대학교산학협력단, 제2권, 제1호, pp. 1~78.
2. 최성우, 2005, “악취오염 개론”, 동화기술교역, 1 p~324p, ISBN : 8942504892.
3. 이민희, 2006, “악취공정시험방법”, 신광출판사, 1p~391p, ISBN : 8970698639.
4. 윤소민, 2003, “쓰레기의 악취제거제 및 악취제거 방법”, 특허출원 10-2003-0097117.