

*Candida utilis*를 이용한 furfural 함유 식품가공 폐수의 처리

박기영 · †정진영
† 한국과학기술연구원 환경공정연구부
(접수 : 2003. 4. 10. 게재승인 : 2003. 7. 31.)

Treatment of Food Processing Wastewater bearing Furfural by *Candida utilis*

Ki-Young Park and Jin-Young Jung†
† Environment & Process Technology Division, KIST, 39-1 Hawolgok-dong, Sungbuk-ku, Seoul 136-791, Korea
(Received : 2003. 4. 10. Accepted : 2003. 7. 31.)

A yeast treatment process was applied to treat food processing organic wastewater containing inhibitory material to anaerobic bacteria. The wastewater contained high concentration of the furfural as a by-product from the food processing. Aerobic yeast (*Candida utilis*) was selected to remove organics in wastewater. The batch test showed that the wastewater had an inhibition to anaerobic bacteria. The optimum level of temperature for yeast treatment was ranged from 25 to 45°C. The pH range from 4 to 8 was favorable to yeast growth. The continuous flow reactor was operated at various SRTs. The results were satisfactory with the reduction of COD up to 90% at SRT of more than 1 day. Through the kinetic study of the yeast, the remained COD concentration was mainly caused by the formation of soluble microbial product (SMP).

Key Words : Food processing wastewater, aerobic yeast, pH, temperature, soluble microbial product (SMP)

서론

고농도 유기 산업폐수를 일반적인 호기성 활성슬러지로 처리할 경우에는 많은 에너지의 소모 및 슬러지 처리 등의 운영상의 어려움이 있다. 따라서, 고농도 유기폐수의 처리에는 에너지의 소모가 작고 슬러지 생성량이 호기성 공정의 약 1/10 정도인 혐기성처리법이 주로 이용되어 왔다. 그러나, 혐기성 공정은 독성물질에 대해 호기성 미생물보다 민감하여, 혐기성 미생물에 피해를 미치는 물질을 함유하고 있는 경우는 적용이 어렵다(1). 실제로 식품 가공산업에서는 많은 양의 유기 폐수가 배출되는데, furfural과 같은 독성물질이 포함되어 있기 때문에 처리에 많은 어려움을 겪고 있다. 이러한 독성물질 함유 유기폐수의 처리의 방안으로서 호기성 효모 처리공정을 도입을 검토할 수 있다(2-4). 효모 처리공정은 유기폐수 처리에 종종 도입되어 왔으며, 특히 유분을 함유하여 고액분리가 곤란한 폐수 등에 효과가 탁월하며, 알코올 생산, 석유

화학폐수와 같은 산업폐수에 적용된 예가 있다(5, 6).

또한 Jin(7, 8)에 따르면 효모는 여러 유기물을 기질로 사용할 수 있으며, 효모의 메탄올 분해에 대해 연구하였다. 이 때 메탄올을 사용할 수 있는 효모로는 *Candida boidinii*, *Hansenula hennicii* 및 *Torulopsis molischiana*를 보고하였다. Fukui와 Tanaka(9)는 여러 종의 효모를 사용하여 알칸(alkanes)의 생분해를 연구했는데 *C. tropicalis*, *C. oleophia* 및 *Saccharomycopsis lipolytica*이 사용 가능하다고 하였다. *C. tropicalis* 및 *Saccharomycopsis lipolytica* 또한 석유화학 폐수의 알칸 분해에 효과적이라고 보고되었다(6). 전분 폐기물 처리에도 효모공정이 적용되었는데 처리 과정에서 나오는 폐기생체는 Arnold(10)에 따르면 동물 또는 가축 사료의 비타민과 단백질원으로서 활용할 수 있는 것으로 보고되었다. 휘발성 유기 지방산 (VFA, Volatile Fatty Acids)의 경우 *C. utilis*가 효과적이라고 하였지만 이러한 연구의 보고는 많지 않다(11).

본 연구는 식품 공업과 같은 고농도 폐수 중 일반적인 혐기성 미생물처리가 곤란한 저해물질을 함유한 실제 곡물식품 제조 공정 폐수의 호기성 효모에 의한 처리에 관하여 고찰하였다.

재료 및 방법

† Corresponding Author : Environment & Process Technology Division, KIST, 39-1 Hawolgok-dong, Sungbuk-ku, Seoul 136-791, Korea

Tel : +82-2-958-5837, Fax : +82-2-958-5839

E-mail : jyjung@kist.re.kr

실험재료 및 장치

본 연구에서는 곡물식품 (cereal) 제조 산업체에서 배출되는 고농도 폐수를 대상으로 연구하였다. 연구기간 중 폐수의 주요 구성 성분인 휘발성지방산 (아세트산, 프로피온산 및 부틸산), furfural, 암모니아성 및 질산성 질소, 인 및 황산염 등을 분석하였다. 이 폐수는 제조공정의 부산물인 furfural을 다량 함유하고 있는 특징이 있다. Table 1에서 보듯이 화학적 산소요구량 (COD)이 10,000에서 20,000 mg/L의 범위에 있었고 유기물의 70% 이상이 휘발성 지방산으로 구성되어 있었고 100에서 2,000 mg/L 정도의 furfural이 포함된 폐수이었다. Furfural 및 폐수의 혐기성 저해 실험을 위하여 에탄올에 순응시킨 혐기성 미생물을 사용하였으며 serum 병을 이용하여 회분식 실험을 실시하였다. 본 연구에서는 Elmaleh 등(11)에 의해 휘발 유기지방산 분해에 대한 보고가 있는 *Candida utilis*를 사용하여 실험하였다. 본 연구에서 사용한 *Candida utilis* (ATCC 9950)는 미국균주은행으로부터 분양을 받아서 실험을 수행하였다. 연속배양 실험은 Fig. 1과 같이 장치를 구성하였다.

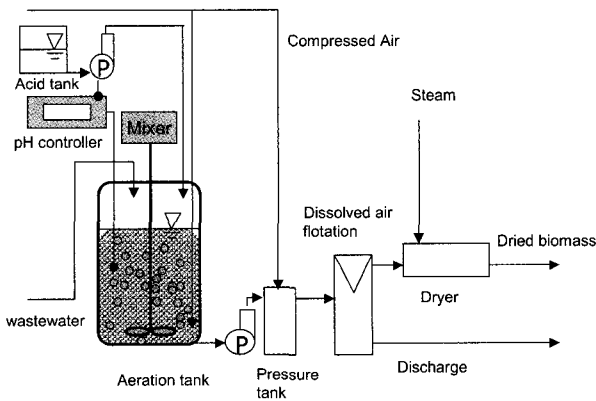


Figure 1. Schematic diagram of continuous culture.

Table 1. Characteristics of food processing wastewater

Compound	Concentration*
COD (mg/L)	15,600±1,800
BOD (mg/L)	9,800±1,500
Acetic Acid (mg/L)	7,100±1,200
Propionic acid (mg/L)	2,080±1,020
Butyric acid (mg/L)	240±160
Furfural (mg/L)	2,100±680
VSS (mg/L)	15±3
pH	<3
Temperature (°C)	>55

* ± standard deviation

실험 및 분석방법

식품폐수 및 furfural에 대한 혐기성 독성 실험은 160 mL serum 병에 기질과 무기염이 함유된 용액 90 mL와 에탄올로 순응시킨 식종균 10 mL (미생물 농도: 2.78-3.24 g VSS/L)를 더한 뒤, 즉시 N₂ 가스로 1 분간 flushing하고 고무마개로 밀봉한 다음 35°C 항온 진탕기 (180 rpm)에서 배양을 시작하였다. 메탄 발생량은 가스밀봉 주사기를 이용하여 주기적으로

발생 기체량 및 기체 조성을 측정하여 구하였다. 또한 효모를 사용한 회분식 실험을 통하여 최적 pH 및 온도의 영향에 대하여 조사하였으며, 호흡을 측정법(respirometry)을 이용하여 동력학적 상수를 결정하여 연구를 수행하였다. 회분식 실험은 염화암모늄 및 인산을 첨가하여 C : N : P 비가 100 : 5 : 1가 되도록 조정하였고, 초기 pH 및 생체량을 각각 4.5 및 5 g/L인 조건에서 실험하였다. 실험실 규모의 연속 처리 반응조는 2.5 L의 부피를 가졌으며, 1.8 L의 유효 부피로 실험하였다. 연속 실험은 회분식 실험에서 구한 환경조건을 이용하였으며, 세균의 성장을 제한하기 위하여 낮은 pH인 4.5로 유지하기 위해 1 N 수산화나트륨 (원수 pH가 매우 낮음)을 주입하였고 고온으로 배출되는 폐수 조건을 감안하여 처리온도를 35°C로 설정하였다. 연속유입 완전 혼합 형태 (chemostat)로 운전된 반응조의 고형물 또는 수리학적 체류시간 (SRT or HRT)을 변화시키면서 실험하였다.

COD, BOD₅, SS, NH₃-N와 NO₃-N 등의 일반적인 분석은 Standard Methods(12)를 따랐으며, 휘발성지방산 (VFA)은 FID (Flame Ionization Detector)를 장착한 가스크로마토그래프 (HP 6890)를 사용하였다. Furfural은 액체크로마토그래프 (HPLC Dionex Inc., Sunnyvale, Ca with Dionex Rp300-C18 column)을 이용하여 UV 검출기의 280 nm에서 분석하였고 이동상은 메탄올과 물을 1 : 1로 혼합한 혼합액을 0.5 ml/min로 유속으로 운전하였다.

결과 및 고찰

독성시험

식품가공 폐수 및 furfural의 혐기성 독성시험은 furfural 함유 유기 폐수의 혐기성 생물분해에 미치는 저해효과를 평가하기 위하여 수행하였다. 발생하는 모든 가스는 35°C에서 측정하였으며, 공기시험을 통하여 보정한 후 다음 식 (1)을 이용하여 표준상태(STP)로 환산하였다.

$$V = (V_s - V_b) \left(\frac{273}{273 + 35} \right) \left(\frac{29.92}{P} \right) \tag{1}$$

V는 net gas produced at STP (ml)를, V_s은 gas produced by sample at 35°C (ml)을, V_b는 as produced by blank at 35°C (ml)을, P는 atmospheric pressure (inches Hg)를 나타낸다.

혐기성 미생물에 대한 식품가공 폐수 및 furfural의 저해효과를 정량적으로 기술하기 위하여 회분식 실험을 통해 얻은 자료를 성장 자료를 나타내는데 가장 적합한 것으로 보고된 수정 Gompertz식(13)을 사용하여 결정하였다(Fig. 2).

$$M = P \cdot \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_m \cdot e}{P} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \tag{2}$$

M은 cumulative methane production (ml)을, t는 elapsed time (day)을, e는 exp(1)을, R_m은 maximum methane production rate (L/day)를, λ는 lag time (day)을 나타낸다.

한편, 여기에서 얻은 시료에 대한 최대메탄 발생 속도 (R_m)를 비교함으로써 농도에 따른 저해 및 처리성을 평가할

수 있었다. 저해 백분율은 다음 식 (3)을 이용하여 구하였다.

$$\% \text{ inhibition} = \left[1 - \frac{R_{m, \text{sample}}}{R_{m, \text{control}}} \right] \cdot 100 \quad (3)$$

$R_{m, \text{sample}}$ 은 maximum methane production rate of the sample (L/day)을, $R_{m, \text{control}}$ 은 maximum methane production rate of the control (L/day, substrate = ethanol)을 나타낸다.

Fig. 2.에 나타난 바와 같이, furfural의 경우 약 600 mg/L를 주입했을 때 약 50 퍼센트의 저해를 보였고, 실제 폐수의 경우 약 1,200 mg/L에서 50%의 독성을 나타내었다. 이 결과는 식품폐수 내에 furfural을 다량 함유할 경우 혐기성 처리에 큰 저해를 미칠 수 있기 때문에, 단일 혐기성 처리가 어려울 것으로 판단되었다. 따라서 호기성 효모에 의해 쉽게 분해가 일어난다면 혐기성 세균에 대한 저해 물질을 함유한 고농도 유기폐수의 처리에 있어 좋은 대안의 하나가 될 수 있을 것으로 판단되었다.

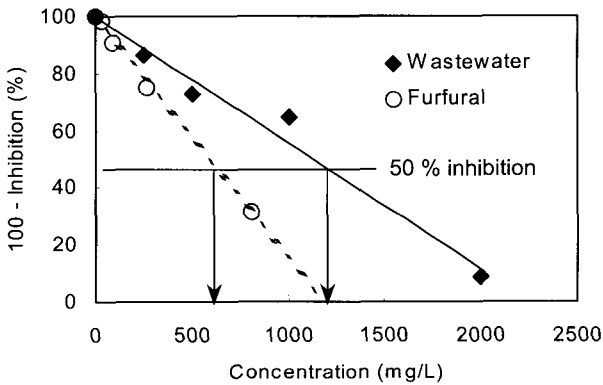


Figure 2. Level of inhibition for the food processing wastewater and furfural in the anaerobic toxicity test.

온도의 영향

온도에 따른 효모의 성장의 영향에 관한 조사는 15에서 50°C의 범위에서 회분식 실험을 통하여 수행하였다. 성장 속도에 관한 온도의 표현은 일반적으로 Arrhenius 식 등이 널리 이용되어 왔으나 본 연구에서 비교적 넓은 범위에서 온도 영향을 살펴보고 최적의 온도 조건을 도출하기 위하여 다음 식 (4)과 같은 Ratkowsky 식을 이용하여 나타내었고, 이를 이용하여 효모성장에 대한 최적 온도를 조사하였다(14).

$$q = b(T - T_{\min}) \{ 1 - \exp[-c(T - T_{\max})] \} \quad (4)$$

q 는 square root of the specific growth rate (L/h)를, T 는 Temperature (°C)를, b , c 는 constants를, T_{\min} 은 minimum temperature for growth (°C)를, T_{\max} 는 maximum growth rate for growth (°C)를 나타낸다.

회분식 실험결과 효모는 일상적인 온도에서 폐수를 비교적 원활히 분해하는 것으로 나타났다. Fig. 3에 나타난 바와 같이, 비록 최적 온도는 식 (4)에 의해 37°C 부근인 것으로 계

산되었지만 성장이 활발한 온도의 범위는 25에서 45°C인 것으로 나타났다. 실제로 본 폐수는 비교적 고온에서 방출되고 있어 연속실험에서는 이 결과를 바탕으로 실험온도를 보통 오염물 처리에서 중온이라고 말하는 35°C로 결정하여 실험을 진행하였다.

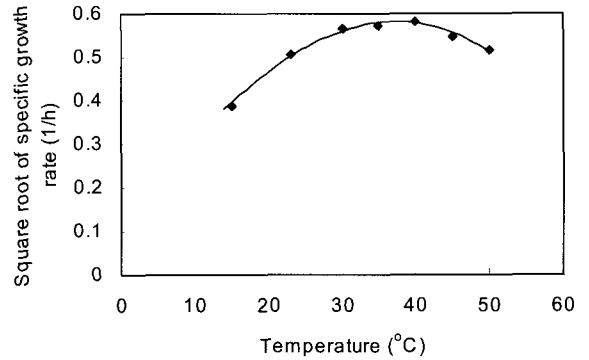


Figure 3. Effect of temperature on square root of the specific growth rate.

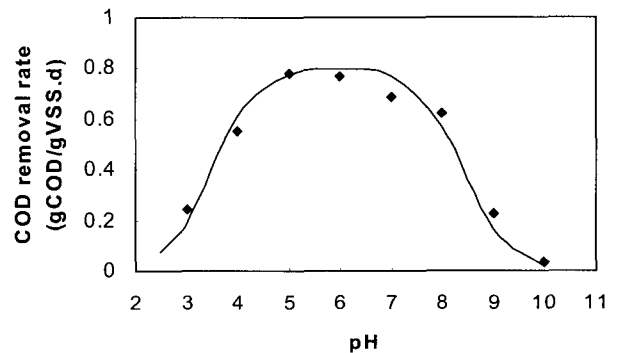


Figure 4. Effect of pH on COD the removal rate in batch test.

pH의 영향

미생물의 처리에 있어 또 하나의 중요한 환경인자는 pH이다. 본 폐수의 경우 매우 낮은 농도로 방출되고 있어 pH를 조절해야 할 필요가 있기 때문에 최적 pH 범위를 아는 것은 중요하다. 미생물의 활성도는 효소의 활성도에 따라 조절되며, 아미노산으로 구성된 효소의 활성도는 pH에 영향을 크게 받는다. 효소의 활성도로 나타내어지는 pH의 영향은 다음 식 (5)로 나타낼 수 있다(15).

$$r = \frac{r_{\max}}{1 + \frac{K_{OH}}{[H^+]} + \frac{[H^+]}{K_H}} \quad (5)$$

r 은 overall COD removal rate (g COD/g VSS-day)를, r_{\max} 는 maximum COD removal rate (g COD/g VSS-day)를, K_{OH} , K_H 는 equilibrium constants를 나타낸다.

Fig. 4에서 보면 최적 pH의 범위는 4에서 8로서 세균에 비하여 비교적 넓은 범위에서 성장가능 한 것으로 나타났으며,

매우 낮은 pH 영역에서도 높은 제거속도를 보이고 있다. 계산된 최적 pH 값은 약 5.8이었으나 효모의 처리에 적합한 pH는 낮은 원수의 pH와 세균의 성장을 최소화하기 위해서 후속의 연속실험에서는 pH를 4.5로 조절하여 실험을 진행하였다.

연속처리에서 고형물체류시간 (SRT) 영향

회분식 실험에 따라 얻어진 조건에 기초하여 연속운전의 환경조건을 pH 4.5 및 35°C에서 실험을 수행하였다. 또한 SRT를 2에서 0.4일까지 낮추면서 SRT에 따른 처리의 영향을 조사하였다. 처리수 내의 COD는 SRT가 1일 이상에서 1,000에서 2,000 mg/L 사이의 값을 나타내었다. 이것은 원수 속의 유기물이 15,600 mgCOD/L임을 고려할 때 90% 이상 제거된 것을 알 수 있다. 하지만, SRT를 짧게 하였을 때는 유출수 농도가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 유출되는 COD 뿐만 아니라 BOD로 측정할 때도 400-1,000 mg BOD₅/L의 비교적 높은 값으로 나타내었다. 그러나 처리수의 경우, 효모로 식종하여 BOD₅를 측정하면 거의 검출되지 않았다. 즉, 이것은 연속처리 후 남아 있는 유기물은 용존 미생물 생성물(soluble microbial product, SMP)로 판단되었다. 이에 대한 타당성을 추정하기 위하여 동력학적 고찰을 시도하였다.

효모를 이용하여 회분식 실험을 실시하여 동력학적 인자를 조사하였다. *C. Utilis*에 대한 동력학적 상수 (kinetic parameters)는 호흡을 측정법 (respirometry)으로 산출하였다. 호흡을 측정법에 의한 동력학적 인자의 도출은 Barbeau (1992)에 의해 보고된 바와 같이, 효모를 식종한 용기에 용존산소로 포화시킨 후 일정시간 후에 기질을 첨가하여 산소소모율을 측정하여 동력학적 인자를 도출하였다(16). 회분식 실험에서 조사된 동력학적 상수를 이용하여 기질농도에 따른 효모의 비기질 제거속도를 나타내었다(Fig. 5). 호흡을 측정시험 결과에 따르면, pH 4.5 및 온도 35°C에서 *C. utilis*의 혼합계균 q_m 값, K_s 값 및 Y 값은 각각 0.44 1/h, 160 mgCOD/L, 및 0.34 g VSS/g COD인 것으로 조사되었다.

연속배양 (chemostat) 실험의 운전조건에 동력학적 상수값 및 물질수지를 이용하여 얻어진 동력학적 식들을 사용하여 유출되는 유기물을 추정하였다. 반응조에서 유출되는 유기물 농도는 연속배양의 물질수지로부터 다음 식 (6)으로부터 얻어질 수 있다(17).

$$S = K_s \frac{1 + k_d SRT}{SRT(\mu_m - k_d) - 1} \quad (6)$$

S 는 substrate concentration (mg/L)을, K_s 는 half saturation constant (mg/L)를, k_d 는 decay coefficient (1/day)를, SRT 는 solids retention time (day)을, μ_m 은 maximum growth rate (1/day)를 나타낸다.

이 때 SRT 가 매우 작으면 S (유출농도) = S_0 (유입농도) 및 $X = 0$ 이 되는데 이러한 상황을 유실 (washout)이라 하고 더 이상의 기질이 제거되지 않으며 생체가 증가하지 않는다. 유실이 일어나기 시작하는 SRT 를 SRT_{min} 이라 하고 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$SRT_{min} = \frac{K_s + S_0}{S_0(\mu_m - k_d) - k_d K_s} \quad (7)$$

S_0 는 influent substrate concentration (mg/L)을 나타낸다.

회분식 실험에 의해 얻은 *C. utilis*의 동력학적 상수값을 사용하여 연속운전에 대입시켜 최소 SRT를 계산하면 0.3일 정도로 된다. 실제로 실험에서 SRT가 0.6일 이하로 되면 유출수의 COD가 급격히 증가하였다(Fig. 6).

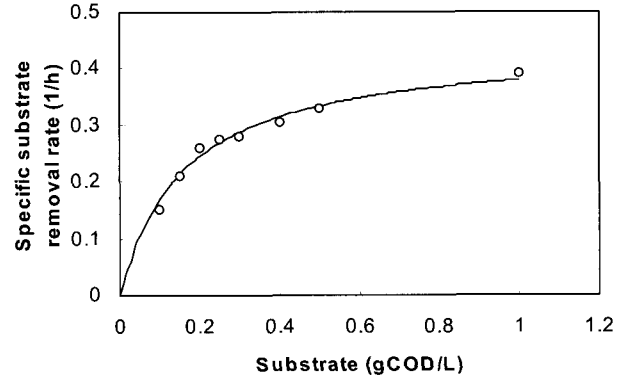


Figure 5. Substrate concentration versus specific substrate removal rate for *C. utilis*.

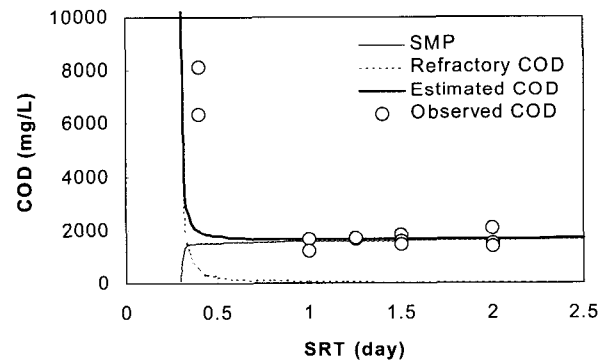


Figure 6. Estimated effluent organic matter according to SRTs.

또한 SMP (용존 미생물 생성물) 생성에 관한 동력학적 식은 다음 식(8)과 같이 제시되었다(18).

$$S_{MP} = \left[\frac{Y_{MP}}{Y} (1 + k_d SRT) + k_d f_{MP} SRT \right] \cdot X_v \quad (8)$$

S_{MP} 는 soluble microbial product (mg COD/L)를, Y_{MP} 는 microbial product yield를, Y 는 yield coefficient of yeast를, f_{MP} 는 fraction of biomass contributing to biomass associated products를, X_v 는 yeast concentration (mg VSS/L)을 나타낸다.

앞에서 구한 기본적인 동력학적 상수와 Grady 등(6)이 제시한 문헌 값을 참조하여 Y_{MP} , 0.1 및 f_{MP} , 0.1를 사용하여 식 (8)를 통하여 추정하면 Fig. 6과 같은 SRT에 따른 SMP 및 유출 유기물을 추정할 수 있다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 많은 양의 유기물이 SMP로부터 기인할 수 있으며 동력학적 식

을 사용한 예상치는 실험에서 얻은 값과 상당한 유사성을 보이고 있다.

결 론

기존의 하폐수 처리 공정을 이용한 방법으로 처리가 곤란한 저해물질을 포함한 고농도 식품 산업폐수에 대하여 호기성 효모에 의한 처리에 관하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 예비실험인 저해성 실험을 통하여 furfural 및 이것을 다량 함유한 폐수는 혐기성 미생물에 저해를 끼치는 것으로 조사되고 furfural의 경우 50%의 저해는 약 600 mg/L에서 일났다.
2. 회분실험을 통하여 온도에 대한 영향을 조사한 결과 *Candida utilis*를 사용한 효모처리는 적정 온도범위가 25°C에서 45°C였고, 최고값은 37°C인 것으로 나타났다.
3. *Candida utilis*의 유기물 분해에 미치는 적정 pH는 통상적인 미생물 폐수처리 시보다 넓은 범위인 pH 4-8로 나타났다.
4. 온도 35°C 및 pH 4.5에서 연속처리 결과는 체류시간 1일 이상에서 유입 COD의 90% 이상이 제거되었으나 처리수에는 여전히 1,000 mg/L 이상의 농도로 유기물이 검출되었다. 이것은 동력학적인 접근법으로 추정된 SMP와 상당히 일치하는 값으로서 SMP에 기인하는 것으로 추정되었다.

요 약

혐기성 미생물에 저해가 되는 물질을 포함하는 고농도 폐수의 효모에 의한 처리에 관하여 연구하였다. 폐수는 furfural 부산물이 배출되는 식품가공 공정의 배출폐수를 대상으로 실험하였다. 본 연구에서는 호기성 효모의 일종인 *Candida utilis*가 실험에 적용되었다. 회분 실험을 통하여 본 폐수는 혐기성 미생물에 저해 영향을 주는 것으로 밝혀졌다. 본 공정의 최적 온도는 25에서 45°C이었으며 효모의 성장에 적당한 pH는 4에서 8사이임을 알 수 있었다. 연속실험 결과, 체류시간 1일 이상에서 COD가 90% 이상 제거되었다. 그러나 유출수 중의 유기물 농도는 여전히 다소 높은 것으로 조사되었다. 따라서 동력학적으로 해석하여 추정된 결과 남은 유기물은 대부분은 용존 미생물 생성물 (SMP, Soluble Microbial Product)에서 기인하는 것으로 판단되었다.

감 사

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연구지원에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

1. Speece, R. E. (1996), *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters*, p394, ARCHE Press, Nashville, Tennessee.
2. Henry, D. P. and R. H. Thomson (1993), A New process to treat strong biological waste, *Water Sci. Technol.* **27**, 213-218.
3. Koh, S. H. and T. G. Ellis (2002), Protocol for early detection and evaluation of inhibitory wastewater using combined aerobic respirometric and anaerobic batch techniques, *CD-ROM Proc. WEFTEC 2002 conference*, Chicago.
4. Tahezadeh, M. T., L. Gustafsson, C. Niklasson, and G. Lidén (1999), Conversion of furfural in aerobic and anaerobic batch fermentation of glucose by *Saccharomyces cerevisiae*, *J. Bioscience Bioengineering* **87**, 169-174.
5. Kaeppli O., N. Halter, and Z. Puhán (1986), Simple process for culturing yeast on ultrafiltration permeate from milk or whey, *GBF-Monograph Series* **6**, 75-82.
6. Rehm, H. J. and I. Rief (1981), Mechanisms and occurrence of microbial oxidation of long-chain alkanes, *Adv. Biochem. Eng.* **19**, 175-215.
7. Jin, B., J. van Leeuwen, and B. Patel (1999), Mycelial morphology and fungal protein production from starch processing wastewater in submerged cultures of *Aspergillus oryzae*, *Process Biochemistry* **34**, 335-340.
8. Jin, B., Q. Yu, X. Q. Yan, and J. van Leeuwen (2001), Characterization and improvement of oxygen transfer in pilot plant external air-lift bioreactor for mycelial biomass production and wastewater treatment, *World J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* **17**, 265-272.
9. Fukui, S. and A. Tanaka (1981), Metabolism of alkanes by yeasts, *Adv. Biochem. Eng.* **19**, 217-237.
10. Arnold, J. L., J. S. Knapp, and C. L. Johnson (2000), The use of yeasts to reduce the polluting potential of silage effluent, *Water Res.* **34**, 3699-3708.
11. Elmaleh, S., M. B. Defrance, and C. Ghommidh (1999), Organic acids oxidation by *Candida utilis*: Application to industrial waste water treatment, *Process Chemistry* **35**, 441-449.
12. APHA, WEF, AWWA (1998), *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 20th ed., p1-49, Washington DC.
13. Zweitering, M. H., I. Jongenburger, F. M. Rombouts, and K. van't Riet (1980), Modeling of the bacterial growth curve, *Appl. Environ. Microbiol.* **56**, 1875-1881.
14. Ratkowsky, D. A., R. K. Lowry, T. A. McMeekin, A. N. Stokes, and R. E. Chandler (1983), Model for bacterial growth throughout the entire biokinetic range, *J. Bacteriology* **154**, 1222-1226.
15. Yu, H. Q. and H. H. P. Fang (2003), Acidogenesis of gelatin-rich wastewater in an upflow anaerobic reactor: Influence of pH and temperature, *Wat. Res.* **37**, 55-66.
16. Barbeau D. S. (1992), Determination of extant biodegradation kinetics from a single oxygen consumption curve, M. S. Thesis, Clemson University, Clemson.
17. Rittmann, B. E. and P. L. McCarty (2001), *Environmental Biotechnology: Principles and Application*, p754, McGraw-Hill, New York.
18. Grady, C. P. L. Jr., G. T. Daigger, and H. S. Lim (1999), *Biological Wastewater Treatment: Theory and Applications*, 2nd ed., p1076, Marcel Dekker Inc., New York.