

# 열-알칼리 전처리를 통한 음식물류 폐수 부상 스크의 가용화

최재민<sup>1</sup> · 이채영<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>수원대학교 토목공학과, <sup>2</sup>하천환경기술연구소

## Disintegration of Flotation Scum in Food Wastewater Using Thermo-Alkaline Pretreatment

JAE-MIN CHOI<sup>1</sup>, CHAE-YOUNG LEE<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Civil Eng., The University of Suwon, 17, Wauan-gil, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Korea

<sup>2</sup>Institute of River Environmental Technology, 17, Wauan-gil, Gyeonggi-do, Korea

**Abstract** >> This study was performed to optimize the integrated thermal-alkali pre-treatment of flotation scum for the enhanced biodegradability. The optimum conditions of the integrated thermal-alkali pre-treatment were obtained using response surface methodology. The disintegration degree of carbohydrate (69.2%) and protein (57.3) were estimated under the optimum conditions. Although the optimum conditions were different, the disintegration degrees were similarly. A fermentative hydrogen batch test was conducted to evaluate the hydrogen production from scum with and/or without. The maximum hydrogen production from scum with pre-treatment was of 0.64 mol H<sub>2</sub>/mol hexoseadded, which about 1.4 times higher than without pre-treatment.

**Key words** : Scum(스큘), Thermo-alkaline pre-treatment(열-알칼리 전처리), Anaerobic H<sub>2</sub> fermentation(혐기성 수소 발효), Response surface methodology(반응표면분석법)

## 1. 서 론

국내의 음식물류 폐기물은 생활수준의 향상, 음식 문화의 특이성 등으로 매년 증가하는 경향으로 나타났다<sup>1-2)</sup>. 이러한 음식물류 폐기물을 처리하기 위해 국내에 260여개의 자원화 시설이 설치·운영 중에 있다<sup>3)</sup>. 음식물류 폐기물의 처리 또는 자원화 과정에서 유기성 물질을 다량으로 포함하고 있는 음식물류 폐수가 발생된다<sup>4)</sup>. 2013년을 기준으로 음식물류 폐수의 해양투기가 금지되어 자원화 등과 같은 육상처리

방안이 주목받고 있다<sup>5)</sup>. 육상처리 방안 중 혐기성 소화 공정은 유기성 폐기물의 처리뿐만 아니라 메탄, 수소 등의 에너지를 생산할 수 있는 장점을 가지고 있다<sup>6-7)</sup>.

음식물류 폐수 내에는 다양한 섬유질을 포함하고 있으며, 이러한 섬유질은 비중이 낮은 성분과 결합하여 반응조 상단으로 부상한다. 부상된 결합 물질은 스크럼으로 전환되어 반응조 상단에 층을 형성한다<sup>8)</sup>. 스크럼층은 미생물과 기질의 접촉, 교반 등을 방해하여 혐기성 소화조 운전의 저해요인을 작용한다<sup>8)</sup>. 따라서 최근에는 혐기성 소화 공정 시 발생하는 스크럼을 제거하기 위해 장치를 설치 운영하고 있다<sup>5)</sup>.

스큘를 구성하는 물질은 기질에 따라 상이할 수

<sup>†</sup>Corresponding author : chaeyoung@suwon.ac.kr

Received : 2014.12.15 in revised form 2015.02.25 Accepted: 2015.02.28

Copyright © 2015 KHNES

있으나 단백질 및 섬유질 등으로 대표될 수 있다. 이 중 단백질의 경우에 분자량이 높은 물질로써 14.6 - 250kD으로 넓은 범위를 가진다. 또한 분자량이 큰 단백질은 물에 잘 녹지 않으며 침전되지 않는다<sup>9)</sup>. 이러한 단백질은 혐기성 소화 시 지방이나 섬유질에 비해 분해율이 낮은 것으로 보고되고 있다<sup>10)</sup>. 음식물류 폐기물의 건조중량 대비 75%정도는 주로 셀룰로오스 화합물과 같은 섬유질의 기본 단위인 탄수화물로 구성되어 있다<sup>11)</sup>. 이러한 셀룰로오스 화합물은 혐기성 소화 시 생분해도가 50%이하로 보고되고 있다<sup>11)</sup>.

현재까지 스크는 혐기성 소화의 안정적 운전을 위한 제거 대상으로 여겨지며 제거 기술 개발이 주로 진행되었다. 그러나 스크의 구성물질인 단백질과 섬유질은 적절한 가용화 방법이 적용될 경우 생분해도 향상을 기대할 수 있을 뿐만 아니라 에너지원으로서 가치가 있다.

가용화 방법에는 열처리, 초음파 처리, 기계식 처리, 화학적 처리 등 다양한 방법이 있다. 기계식 처리의 경우 높은 효율을 기대할 수 있으나 에너지 소모가 큰 단점이 있다<sup>12)</sup>. 초음파 처리는 현장 적용 시 탐침을 1.5 - 2.0년을 주기로 교체해야 되는 단점을 가지고 있다<sup>13)</sup>. 화학적 처리의 경우 가용화율은 높으나 에너지원으로서 활용하기 위해 pH를 중성으로 보정해야 한다<sup>12)</sup>. 이러한 단일 공정의 단점을 보완하기 위해 두 가지 이상 방법을 결합한 병합처리에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Shehu 등(2012)은 열-알칼리 병합처리를 이용하여 유기성 폐기물의 바이오가스 발생량이 36% 향상된 것으로 보고하였다<sup>12)</sup>. González 등(2013)은 press mud의 생분해도 향상을 위해 열-알칼리 병합처리를 수행하였으며 그 결과 분해율이 72% 향상된 것으로 나타났다<sup>14)</sup>.

본 연구에서는 스크의 생분해도 향상을 위해 알칼리-열 병합처리를 수행하였다. 병합처리의 최적 조건 도출을 위해 반응표면분석법을 이용하였으며 단백질과 탄수화물 분석을 통해 가용화율을 평가하였다. 또

**Table 1** Characteristics of substrate

Item	Unit	Value
TS	g/L	121.3
VS	g/L	104.2
TCOD (Total Chemical Oxygen Demand)	g/L	161.2
SCOD (Soluble Chemical Oxygen Demand)	g/L	113.2
T-Carbohydrate	g/L	24.1
S-Carbohydrate	g/L	15.2
T-Protein	g/L	34.6
S-Protein	g/L	22.4

한 회분식 혐기성 수소 발효 실험을 통해 스크의 잠재적인 에너지 가능성을 평가하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 기질 및 식중 미생물

#### 2.1.1 기질

기질은 S시 음식물류 폐수 처리 시설의 유입수를 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time, HRT) 2일에서 산 발효 후 발생하는 스크를 이용하였다. S시 음식물류 폐수 처리 시설 유입수의 총 고형물(Total Solids, TS)과 휘발성 고형물(Volatile Solids, VS)은 각각 143.3 및 134.2g/L로 나타났다. Table 1에는 기질로 이용된 스크의 성상을 제시하였다.

#### 2.1.2 식중미생물

식중미생물은 하수처리시설의 혐기성 소화조 유출수를 채수하여 사용하였다. 식중미생물의 TS, VS와 pH는 각각 16.2g/L, 13.2g/L 및 6.8로 나타났다. 식중미생물은 식중 전에 10mm체를 이용하여 불순물을 제거하였으며 수소 소모 미생물의 성장을 억제하기 위해 90°C에서 20분간 열처리를 수행하였다<sup>15)</sup>.

**Table 2** The central composite design with two independent variables and experimental results

Trial No.	NaOH (%)		Temp.		Disintegration degree (%)	
	X <sub>1</sub>	x <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	x <sub>2</sub>	Carbo-hydrate	Protein
1	10	0	100	1.5	49.4	32.8
2	5	-1	90	1	33.7	23.0
3	10	0	40	-1.5	13.5	24.6
4	5	-1	50	-1	11.2	10.7
5	17.5	1.5	70	0	38.2	41.0
6	15	1	50	-1	25.8	32.0
7	15	1	90	1	44.9	36.1
8	2.5	-1.5	70	0	24.7	15.1
9	10	0	70	0	68.5	57.4

### 2.2 기질의 열-알칼리 전처리

열-알칼리 전처리의 최적 조건 도출을 위해 중심합성계획법을 이용하였다. 알칼리 처리의 실험 인자로는 알칼리 투입량과 열처리 온도 선정하였다. Table 2에는 중심합성계획법에 따른 열-알칼리 조건을 제시하였다. 실험값은 식 1을 이용하여 코드 값으로 전환하였다.

$$x_i = (X_i - X_i^*) / \Delta X_i \quad (1)$$

여기서  $x_i$ 는 코드 값을 나타내며,  $X_i$ 는 실험 값,  $X_i^*$ 는 실험값의 중앙값,  $\Delta X_i$ 는 실험값과 중앙값의 간격을 나타낸다.

알칼리 처리는 NaOH를 이용하여 Table 2에 제시된 조건에 따라 투입하여 30분 이상 충분히 교반하였다. 알칼리 처리된 기질은 조건에 따라 열처리를 수행하였으며 열처리 시간은 30분으로 고정하였다.

### 2.3 회분식 혐기성 수소 발효 실험

혐기성 회분식 실험은 아크릴 재질의 유효체적 300mL 반응조를 이용하였다. 반응조 유효체적의

30%는 열처리된 식종 미생물로 채웠으며 나머지 부분은 기질과 초순수를 혼합하여 투입하였다. 이 때 기질은 탄수화물 농도는 30g COD/L로 고정하였다<sup>16)</sup>. 식종이 완료 후 질소 가스를 이용하여 혐기성 조건으로 전환하였다. 혐기성 조건으로 전환된 반응조는 열순환 펌프를 이용하여 35±1°C로 온도 유지가 가능한 온탕기에 배양되었다. 운전 pH는 5N HCl, 3N KOH를 이용하여 5.3±0.1로 유지하였으며 교반 속도는 150 rpm을 고정하였다<sup>17)</sup>. 회분식 혐기성 수소 발효 실험 시 바이오가스 발생량은 체적 측정이 가능한 유리 주사기를 이용하였으며 6시간 간격으로 측정하였다.

### 2.4 분석 및 해석 방법

Table 2에 제시된 조건에 따라 전처리를 수행한 기질의 용존성 탄수화물과 단백질을 측정하여 각각의 가용화율(Disintegration Degree, DD)을 산정하였다(식 2, 3).

$$DD(\%) = \frac{(SCarbo_f - SCarbo_i)}{(TCarbo_i - SCarbo_i)} \times 100 \quad (2)$$

$$DD(\%) = \frac{(SPro_f - SPro_i)}{(TPro_i - SPro_i)} \times 100 \quad (3)$$

여기서  $SCarbo_f$ 와  $SPro_f$ 는 각각 전처리 후의 용존성 탄수화물 및 단백질,  $SCarbo_i$ 와  $SPro_i$ 는 전처리 전의 용존성 탄수화물 및 단백질,  $TCarbo_i$ 과  $TPro_i$ 는 전처리 전의 총 탄수화물 및 단백질을 나타낸다. 용존성 물질의 측정은 0.45µm의 주사기 여과기를 이용하였다. 탄수화물은 Dubois법을 이용하였으며 단백질은 Lowry법을 이용하여 측정하였다<sup>18,19)</sup>.

회분식 혐기성 수소 발효 실험 시 바이오가스 내 수소의 함량은 열전도도검출기(Thermal Conductivity Detector, TCD)가 장착된 가스 크로마토그래피(gas

chromatography, Gow Mac series 580, USA)를 이용하여 측정하였다. 가스 크로마토그래피의 운반체로는 초고순도 질소(99.999%)를 사용하였으며 유속은 30mL/min으로 고정하였다. Column은 molecular sieve 5A(80/100 mesh)를 충전제로 사용한 1.8m × 3.2mm stainless steel column을 이용하였다. Column, injector와 detector의 온도는 50, 80 및 90°C로 유지하였다.

발생된 수소 가스는 수정된 Gompertz 식을 이용하여 지체 시간, 수소 발생을 및 최대 수소 발생량을 평가하였다(식 4).

$$H = P \cdot \exp \left[ - \exp \left\{ \frac{R_m \cdot e}{P} (\lambda - t) + 1 \right\} \right] \quad (4)$$

여기서, H는 누적 수소 발생량(mol H<sub>2</sub>/mol hexose), P는 최대 수소 발생량(mol H<sub>2</sub>/mol hexose), λ는 지체 시간(hr), R<sub>m</sub>은 최대 수소 발생 속도(mol H<sub>2</sub>/mol hexose·hr) 그리고 e는 지수를 나타낸다.

TS, VS 및 COD는 Standard Methods를 기준으로 수행하였다<sup>20)</sup>. 식중 미생물의 pH는 Orion 8102BNUWP ROSS Ultra® pH 전극(Thermo scientific, USA)를 이용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 알칼리-열 전처리 최적화

중심합성계획법의 반응 값으로는 탄수화물과 단백질의 가용화율을 이용하였다. Table 2에는 중심합성계획법에 따른 탄수화물 및 단백질의 가용화율을 제시하였다. 코드 값(0.0)에서 탄수화물과 단백질의 가용화율이 68.5 및 57.4%로 가장 높게 나타났다. 반면에 코드 값(-1, -1)에서 탄수화물과 단백질의 가용화율이 각각 11.2, 10.7%로 가장 낮게 나타났다. 탄수화물과 단백질의 최대 및 최소의 가용화율이 나타난 코드값은 동일한 것으로 나타났다. 식 5와 식6에

**Table 3** Analysis of variance for a response surface model

Source model	Sum of squares	Degree of freedom	Mean squares	F-Value	Prov>F	
Eq. (5)	model	2549.10	5	509.82	13.95	0.0274
	x <sub>1</sub>	249.67	1	249.67	6.83	0.0794
	x <sub>2</sub>	1071.10	1	1073.10	29.36	0.0123
	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	2.84	1	2.84	0.078	0.7985
	x <sub>1</sub> <sup>2</sup>	1015.86	1	1015.86	27.79	0.0133
	x <sub>2</sub> <sup>2</sup>	1015.86	1	1015.86	27.79	0.0133
Eq. (6)	model	1489.01	5	297.80	9.94	0.0438
	x <sub>1</sub>	619.08	1	619.08	20.67	0.0199
	x <sub>2</sub>	96.83	1	96.83	3.23	0.1700
	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	16.80	1	16.80	0.56	0.5083
	x <sub>1</sub> <sup>2</sup>	636.31	1	636.31	21.24	0.0192
	x <sub>2</sub> <sup>2</sup>	619.39	1	619.39	20.68	0.0199

는 코드값과 가용화율(탄수화물 및 단백질)의 관계를 모델 식으로 제시하였다.

$$R_{Car.} = 66.9 + 5.4x_1 + 11.24x_2 - 0.8x_1x_2 - 17.2x_1^2 - 17.2x_2^2 \quad (5)$$

$$R_{Pro.} = 55.9 + 8.53x_1 + 3.4x_2 - 2.1x_1x_2 - 13.6x_1^2 - 13.4x_2^2 \quad (6)$$

두 개의 모델 식과 실험 값의 연관성을 알아보기 위해 분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)을 수행하였다. Table 3에는 ANOVA 결과를 제시하였다. 식 5와 식 6의 “Prov>F”는 각각 0.0274 및 0.0438로 0.05에 비해 낮게 나타나 모델식과 실험결과의 관계가 95% 이상의 유의수준을 가지는 것으로 판단된다<sup>21)</sup>. 식 5의 경우 열처리 온도에 관한 코드 값(x<sub>2</sub>)이 NaOH에 관한 코드값(x<sub>1</sub>)에 비해 “Prov>F” 값이 낮게 나타나 더 의미를 가지는 것으로 나타났다. 식 6의 경우에는 x<sub>2</sub>가 x<sub>1</sub>에 비해 높게 나타났다<sup>21)</sup>. 탄수화물 경우에는 열-알칼리 처리 시 열처리 온도가 NaOH에 비해 높은 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 반대로 단백질은 NaOH가 더 높은 상관성을 가지는 것으로

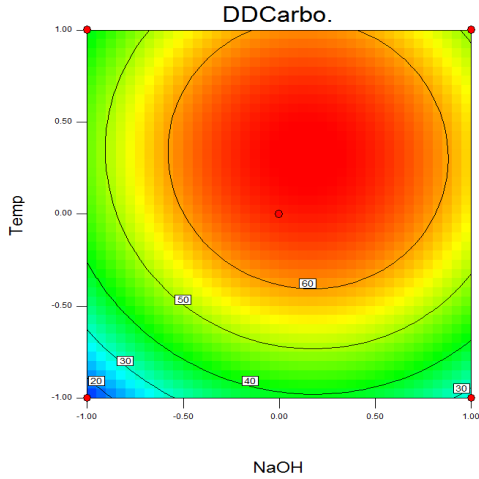


Fig. 1 Contour plots of a fitted response surface to the disintegration degree of carbohydrate

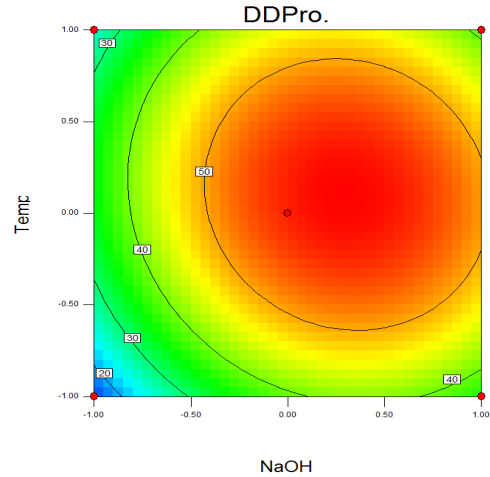


Fig. 2 Contour plots of a fitted response surface to the disintegration degree of protein

판단된다.

Fig. 1과 Fig. 2에는 각각 식 5 및 식 6을 이용한 반응표면분석 결과를 제시하였다. 식 5를 토대로 알칼리-열 병합 전처리의 최적 조건은 코드 값으로 (0.15, 0.32)로 실험 조건으로는 10.8%의 NaOH, 76.4°C의 온도로 나타났으며 예측되는 탄수화물의 가용화율은 69.2%로 나타났다. 이때 단백질 가용화율은 56.4%로 예측되었다.

단백질의 경우에는 (0.31, 0.10)의 코드 값이 최적으로 나타났으며 단백질 가용화율 예측 값은 57.3%로 나타났다. 이때의 탄수화물 가용화율의 예측 값은 67.9%로 나타났다. 두 개의 모델 식으로부터 예측된 탄수화물과 단백질의 최대 가용화율이 코드 범위 안에서 나타난 것으로 보아 실험의 범위는 적정한 것으로 판단된다. 탄수화물과 단백질의 최적 조건은 상이하게 나타났으나 가용화율은 유사하게 나타났다.

탄수화물의 가용화율을 이용하여 도출된 최적 조건은 단백질의 경우에 비해 상대적으로 NaOH 농도가 낮으나 열처리 온도는 높은 것으로 나타났다.

예측된 열-알칼리 전처리의 조건을 토대로 검증실험을 수행하였다. 탄수화물 가용화율로부터 도출된 최적 조건 (10.8%의 NaOH, 76°C)에서 가용화율은

67.2%로 나타났다. 이때의 단백질 가용화율은 55.3%로 나타났다. 단백질의 가용화율로부터 도출된 최적 조건(11.6%의 NaOH, 72°C)에서 가용화율은 57.5%로 나타났으며 탄수화물의 경우에는 68.4%로 나타나 모든 경우의 예측된 가용화율과 유사하게 나타났다.

### 3.2 열-알칼리 처리된 스크의 혐기성 수소 발효 특성

탄수화물(condition 1)과 단백질(condition 2) 가용화율을 이용하여 도출된 각각의 조건으로 전처리된 스크를 이용하여 회분식 혐기성 수소 발효 실험을 수행하였다. Fig. 3에는 회분식 혐기성 수소 발효 특성을 제시하였으며 Table 4에 정리하였다.

전처리를 수행하지 않은 스크의 최대 수소 발생량은 0.46mol H<sub>2</sub>/mol hexose<sub>added</sub>, 최대 수소 발생 속도는 0.013mol H<sub>2</sub>/mol hexose<sub>added</sub>·hr로 나타났다. condition 1과 condition 2로 전처리된 스크의 경우 최대 수소 발생량은 각각 0.64 및 0.63mol H<sub>2</sub>/mol hexose<sub>added</sub>으로 전처리를 수행하지 않은 경우에 비해 40.0% 향상된 것으로 나타났다. 지체기는 전처리를 수행함으로써 최대 20시간 이상 감소된 것으로 나타났다.

Nguyen 등(2008)은 셀룰로오스의 알칼리 처리를

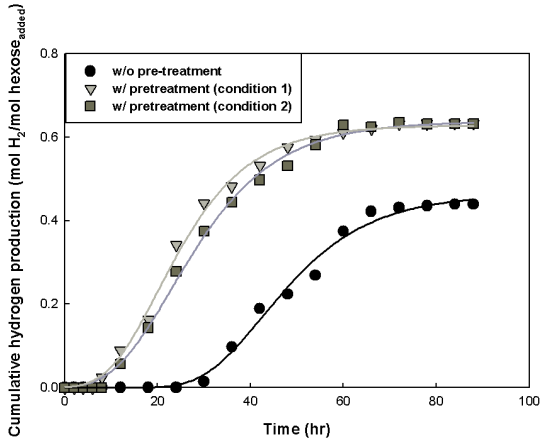


Fig. 3 Hydrogen production of scum with and without pre-treatment

Table 4 Fermentative hydrogen production using scum with and without pretreatment

	H <sub>2</sub> yield (mol H <sub>2</sub> /mol hexose <sub>added</sub> )	H <sub>2</sub> production rate (mol H <sub>2</sub> /mol hexose <sub>added</sub> · hr <sup>-1</sup> )	Lag phase (hr)
w/o pretreatment	0.46	0.013	29.9
w/ pretreatment (condition 1)	0.64	0.019	10.4
w/ pretreatment (condition 2)	0.63	0.021	9.3

수행하였으며 그 결과 15.0%의 NaOH에서 분해율이 42.4% 향상된 것으로 제시하고 있다<sup>23)</sup>. Jung 등(2011)은 포도당, 셀룰로오스 및 헤미셀룰로오스 등으로 이루어진 조류를 이용하여 160°C에서 열처리를 수행하였다. 그 결과에 따르면 수소 발생량은 38.1% 향상된 것으로 나타났다<sup>24)</sup>. 또한 Shahriari 등(2012)의 연구에 따르면 유기성 폐자원의 145°C 열처리 시 분해율이 감소한 것으로 나타났다<sup>25)</sup>. 본 연구에서의 최대 수소 발생량은 40.0% 향상되어 선행 연구들과 유사하게 나타났다. 그러나 선행 연구들의 경우 본 연구에 비해 알칼리 투입량이 많거나 열처리 온도가 높은 것으로 나타났다. 따라서 단일 처리에 비해 병합

처리 시 시너지 효과로 인해 낮은 알칼리 투입량, 낮은 온도에서도 효율이 유사한 것으로 나타난 것으로 판단된다.

Gioannis 등(2013)은 이론적 수소 발생량을 낙산이 생성될 경우 2mol H<sub>2</sub>/mol hexose로 제시하였다<sup>26)</sup>. 본 연구에서 전처리를 수행하지 않은 경우의 이론적 수소 발생량 대비 23.0%가 발생되었으나 전처리를 통해 32.0%로 향상된 것으로 나타났다. 또한 Dong 등(2009)이 제시한 수소의 열량으로 전환 시 전처리를 수행하지 않은 경우 111.3kJ/mol hexose<sub>added</sub>의 에너지가 발생되며 전처리를 통해 154.9kJ/mol hexose<sub>added</sub>로 향상된 것으로 나타났다<sup>23)</sup>.

## 4. 결론

본 연구에서는 음식물류 폐수 처리 시 발생하는 스크를 회수하여 열-알칼리 처리를 수행하였으며 회분식 혐기성 수소 발효 실험을 통해 최대 수소 발생량을 평가하였다.

- 1) 탄수화물과 단백질의 가용화율을 이용하여 열-알칼리 병합 처리의 최적 조건을 도출하였으나 서로 상이한 것을 나타났다. 그러나 검증실험 결과 탄수화물과 단백질의 가용화율은 유사한 것으로 나타났다.
- 2) 열-알칼리 처리된 스크의 최대 수소 발생량은 전처리를 수행하지 않은 경우에 비해 40.0% 향상된 것으로 나타났으며 지체기는 20시간 이상 단축되었다.
- 3) 본 연구는 향후 유기성 폐자원의 혐기성 소화 시 발생하는 스크를 처리와 동시에 에너지를 회수할 수 있는 연구의 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부 도시건축연구개발사업의 연구비 지원(14AUDP-B083704-01)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## References

1. M. H. Kim, S. K. Cho, and S. E. Oh, "Monitoring of reactor stability index inhibition effect in the continuous mesophilic dry anaerobic digestion of high solid food waste", *Journal of Korean Society of Urban environment*, Vol. 11, No. 2, 2011, pp. 161-167.
2. T. W. Jeon, Y. J. Kim, M. J. Jeong, S. K. Shin, Y. W. Jeong, J. E. Park, and G. J. Oh, "Monitoring and strategies for the reduction of household food waste", *Journal of Korea Society of Waste Management*, Vol. 30, No. 8, 2013, pp. 832-840.
3. Ministry of Environment, "Current state of food waste recycling facilities", 2012, Korea.
4. B. K. Min, C. H. Lee, and J. Y. Kim, "Biogas resources from food waste leachate using UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)", *Applied Chemistry for Engineering*, Vol. 23, No. 1, 2012, pp. 28-34.
5. Y. S. Bae and S. K. Chun, "A study on the cause of scale formation in biogas plant with food wastewater", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 35, No. 9, 2013, pp. 660-665.
6. J. I. Kim, Y. S. Yu, and C. S. Lee, "Thermo-alkaline pretreatment of waste activated sludge at low-temperature: Effects on sludge disintegration methane production and methanogen community structure", *Bioresource Technology*, Vol. 144, 2013, pp. 194-201.
7. H. M. Jang, W. W. Lee, J. H. Ha, and J. M. Park, "Effect of organic loading rates on reactor performance and microbial community changes during thermophilic aerobic digestion process of high-strength food wastewater", Vol. 148, 2013, pp. 261-269.
8. N. Ganidi, S. Tyrrel, and E. Cartmell, "Anaerobic digestion foaming causes- A review", *Bioresource Technology*, Vol. 100, No. 23, 2009, pp. 5546-5554.
9. J. R. Clarkson, J. F. Cui, and R. C. Darton, "Protein denaturation in foam", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 215, 1999, pp. 333-338.
10. M. Gonzales, M. Assadi, and S. Ouki, "Effect of sludge composition on the degree of stabilisation and gas production during mesophilic anaerobic digestion", *The 8th European Biosolids and Organic Residuals Conference*, 2003, Wakefield, UK..
11. Ministry of Environment, "Development of self-predicted control system associated with anaerobic co-digestion of food waste and sewage for enhancement of biogas production rate", 2009, Korea.
12. M. S. Shehu, Z. A. Manan, and S. R. W. A., "Optimization of thermo-alkaline disintegration of sewage sludge for enhanced biogas yield", *Bioresource Technology*, Vol. 114, 2012, pp. 69-74.
13. P. Zhang, G. Zhang, and W. Wang, "Ultrasonic treatment of biological sludge: Floc disintegration, cell lysis and inactivation", *Bioresource Technology*, Vol. 98, No. 1, 2012, pp. 207-210.
14. L. M. L. González, H. Vervaeren, I. P. Reyes, A. Dumoulin, O. R. Romero, and J. Dewulf, "Thermochemical pre-treatment to solubilize and improve anaerobic biodegradability of press mud", *Bioresource Technology*, Vol. 131, 2013, pp. 250-257.
15. C. Y. Lee, S. W. Lee, and S. H. Kim "Anaerobic

- batch hydrogen fermentation of the food waste generated from apartment houses using the food waste disposal system”, *Journal of Korea Society of Waste Management*, Vol. 28, No. 5, 2011, pp. 486-492.
16. D. H. Kim, S. H. Kim, K. Y. Kim, and H. S. Shin, “Effect of initial pH independent of operational pH on hydrogen fermentation of food waste”, *Bioresource Technology*, Vol. 102, No. 18, 2011, pp. 8646-8652.
  17. C. Y. Lee, S. W. Lee, S. K. Han, and S. J. Hwang, “Effect of operational pH on biohydrogen production from food waste using anaerobic batch reactors”, *Water Science & Technology*, Vol. 69, No. 9, 2014, pp. 1886-1893.
  18. M. Dubois, K. A. Gilles, J. K. Hamilton, P. A. Rebers, and F. Smith, “Colormetric method for determination of sugars and related substances”, *Analytical Chemistry*, Vol. 28, No. 3, 1956, pp. 350-356.
  19. P. L. Smith, R. I. Hrohn, G. T. Hermanson, A. K. Mallia, F. H. Gartner, and M. D. Provenzono, “Measurement of protein using bicinchoninic acid”, *Analytical Biochemistry*, Vol. 150, 1985, pp. 76-85.
  20. APHA-AWWA-WEF, “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”, 18th edition, American Public Health Assoc., Washington, D. C., USA, 2005.
  21. D. H. Kim, E. Jung, S. E. Oh, and H. S. Shin, “Combined (alkaline+ultrasonic) pretreatment effect on sewage sludge disintegration”, Vol. 44, No. 10, 2010, pp. 3093-3100.
  22. T. A. D. Nguyen, S. J. Han, J. P. Kim, M. S. Kim, Y. K. Oh, and S. J. Sim, “Hydrogen production by the hyperthermophilic eubacterium, *Thermotoga neapolitana*, using cellulose pretreated by ionic liquid”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, No. 19, 2008, pp. 5161-5168.
  23. K. W. Jung, D. H. Kim, and H. S. Shin, “Fermentative hydrogen production from *Laminaria Japonica* and optimization of thermal pretreatment conditions”, *Bioresource Technology*, Vol. 102, 2011, pp. 2745-2750.
  24. H. Shahriari, M. Warith, M. Hamoda, and K. J. Kennedy, “Anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste combining two pretreatment modalities, high temperature microwave and hydrogen peroxide”, *Waste Management*, Vol. 32, No. 1, 2012, pp. 41-52.
  25. G. De Gioannis, A. Muntoni, A. Poletini, and R. Pomi, “A review of dark fermentative hydrogen production from biodegradable municipal waste fractions”, *Waste Management*, Vol. 33, 2013, pp. 1345-1361.
  26. L. Dong, Y. Zhenhong, S. Youngming, and M. Longlong, “Sequential anaerobic fermentative production of hydrogen and methane from organic fraction of municipal solid waste”, *Chinese Journal of Applied Environmental Biology*, Vol. 35, pp. 250-257.