



## 음식물류폐기물의 고효율 바이오가스화를 위한 설계 및 운전 기술지침 마련 연구(II)

- 정밀모니터링 및 기술진단 결과 중심으로

이동진, 강준구, 이수영, 김기현, 배지수<sup>†</sup>

국립환경과학원 폐자원에너지연구과

### A Study on Establishment of Technical Guideline of the Installation and Operation for the Efficient Bio-gasification Facility of Food Wastes ( II )

Results of the Periodical Monitoring and the Technical Inspection

Dongjin Lee, Junkyu Gang, Suyoung Lee, Kiheon Kim, Jisu Bae<sup>†</sup>

National Institute of Environmental Research  
Environmental Resource Research Department, Waste to Energy research Division

#### 목 차

1. 서론
  2. 연구방법
    - 2.1 연구방법 체계도 및 흐름도
    - 2.2 현장조사
    - 2.3 시설진단
    - 2.4 정밀모니터링
  3. 연구결과
    - 3.1 외국의 바이오가스화 시설의 기술지침서 현황
    - 3.2 현장조사 결과
    - 3.3. 정밀모니터링 결과**
    - 3.4. 기술진단 결과**
  4. 음식물류폐기물 바이오가스화 시설의 기술지침서(안)
    - 4.1 설계 지침(안)
    - 4.2 안전 지침(안)
  5. 결론
- 참고문헌

<sup>†</sup>Corresponding author(js7532@korea.kr)

### 3. 연구결과

#### 3.3 정밀모니터링 결과

##### 3.3.1 삼성분 및 유기물 분해율(VS 기준)

고효율 시설에 대한 음폐수의 수분, 가연분, 휘발분(% 기준)을 나타내는 삼성분 분석을 실시한 결과는 [Fig. 4]와 같고, VS/TS, VS 분해율은 [Table 5]와 같다. 평균 TS 함량은 7.0 %, VS 함량 5.5 %, FS 함량 1.4 %, VS 기준 유기물 분해율은 평균 82.2 %로 나타났다.

##### 3.3.2 CODcr 및 영양성분(탄수화물, 단백질, 지방)

음폐수 CODcr 분석 결과는 [Fig. 5]와 같다. 음폐수의 평균 CODcr 값은 유입 78,078 mg/L, 유출 20,617 mg/L로, 소화조를 거쳐 평균 CODcr 제거율 73.6 %로 나타났다.

소화조로 유입되는 음폐수의 영양성분을 분석한 결과는 아래 [Fig. 6]과 같다. 지방, 단백질, 탄수화물 각각 1.22 g/100 g (16.6 %), 1.77 g/100 g (24.2 %), 4.34 g/100 g (59.2 %)를 차지하였다. 유입과 유출의 영양성분 비교시 탄수화물과 지방은 각각 52 %, 67 % 분해되었고 단백질은 이보다 현저히 낮은 9.6 % 감소되었다.

##### 3.3.3 저해요인

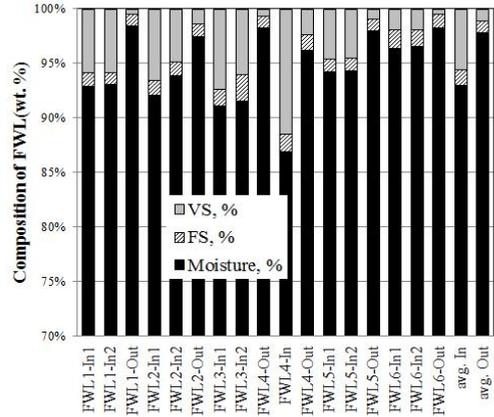
###### 3.3.3.1 휘발성지방산(VFAs)

VFAs는 유기물 분해시 발생하는 화합물로 혐기성반응 상태를 파악하는 지표 중 하나이다. 즉, 혐기성소화조 내부의 VFAs 농도가 과도하게 높을 경우 혐기성반응은 불안정한 상태로 볼 수 있다. 음폐수의 VFAs 분석결과, 평균 유입 5,998 mg/L, 유출 1,239 mg/L로 나타났다.[Fig. 7]

###### 3.3.3.2 질소(TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), 인(TP, PO<sub>4</sub>-P)

질소(TN, NH<sub>3</sub>-N)는 혐기성소화조 내부에서 고농도로 검출될 경우 소화과정의 주요 저해요인으로 작용하는 것으로 알려져 있다. 특히 암모니

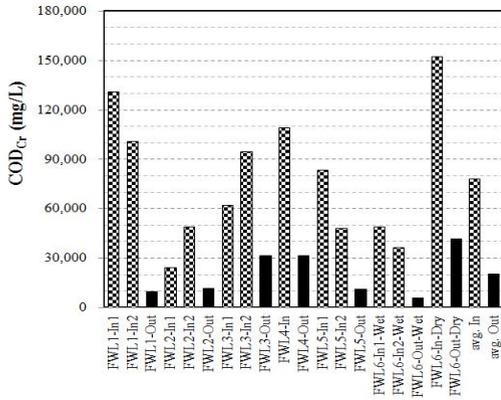
아성 질소(NH<sub>3</sub>-N)는 수소 및 메탄 발생농도, 휘발성고형물 제거율에 영향을 미친다.



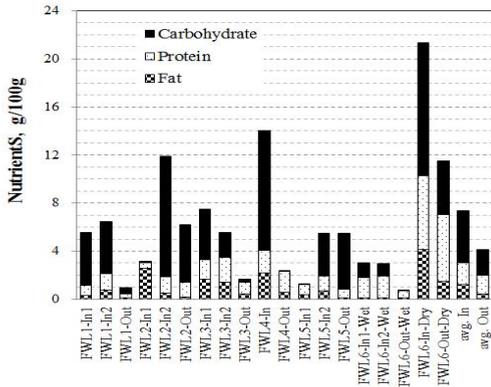
[Fig. 4] Results of the moisture contents, TS and VS.

[Table 5] Results of TS, VS and VS/TS

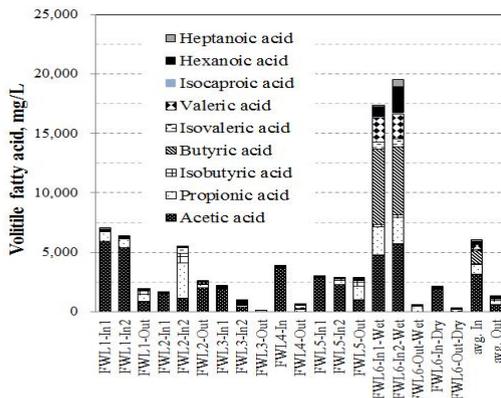
시료명	TS (%)	VS (%)	VS/TS (%)	VS 분해율 (%)
FWL1-In1	7.12	5.84	82.00	
FWL1-In2	6.92	5.81	83.88	
FWL1-Out	1.57	0.52	33.12	91.1
FWL2-In1	7.85	6.59	83.98	
FWL2-In2	6.15	4.83	78.52	
FWL2-Out	2.54	1.39	54.71	79.0
FWL3-In1	8.84	7.40	83.69	
FWL3-In2	8.46	6.05	71.50	
FWL4-Out	1.72	0.71	41.50	90.4
FWL4-In	13.07	11.42	87.36	
FWL4-Out	3.78	2.40	63.48	79.0
FWL5-In1	5.75	4.56	79.37	
FWL5-In2	5.63	4.50	79.84	
FWL5-Out	2.02	0.98	48.40	78.6
FWL6-In1	3.58	1.95	54.36	
FWL6-In2	3.44	1.92	55.81	
FWL6-Out	1.72	0.49	28.24	75.0
avg. In	6.98	5.53	76.39	
avg. Out	2.22	1.08	44.91	82.2



[Fig. 5] Results of CODcr in the food waste.



[Fig. 6] Results of carbohydrates, proteins, fats in the food waste.



[Fig. 7] Results of volatile fatty acids in the food waste.

[Fig. 8]은 음폐수 시료의 총질소(TN)와 암모니아성 질소(NH<sub>3</sub>-N) 농도를 나타내고 있다. 음폐수의 TN 농도는 혐기성소화조를 거치면서 농도가 약간 증가하는 경향을 보이고, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>는 평균적으로 2배 정도 농도가 증가하는 결과를 보인다. 이는 음폐수의 단백질화합물이 분해되어 암모니아성 질소로 전환되어 높은 농도로 유출된 것으로 추측된다.

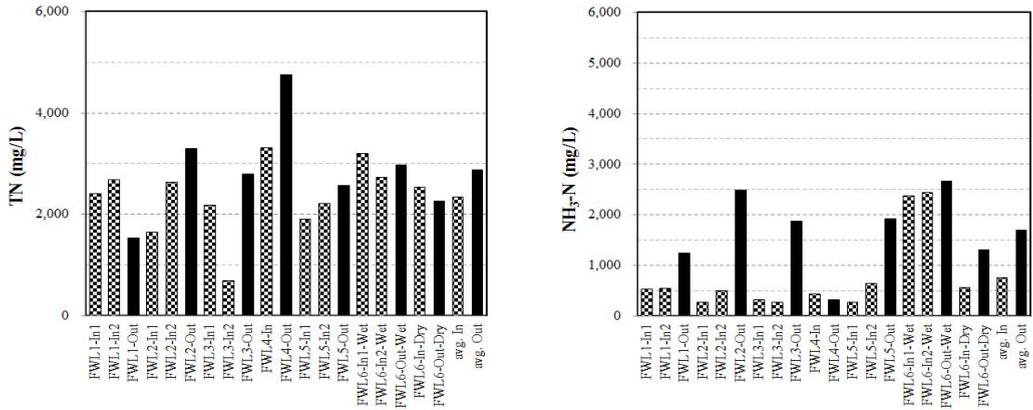
인(TP, PO<sub>4</sub>-P)은 혐기성소화조에서 큰 영향 요인은 아니지만, 뒤에 이어지는 폐수처리공정과 관련하여 간과해서는 안 될 항목이므로 분석을 실시하였다. 음폐수 인(TP, PO<sub>4</sub>-P) 분석결과는 [Fig. 10]과 같으며, 음폐수의 평균 TP 농도는 유입 413.6 mg/L, 유출 156.3 mg/L로, 평균 PO<sub>4</sub>-P 농도는 유입 219.4 mg/L, 유출 31.8 mg/L로 나타났다[Fig. 9].

### 3.3.4 이론적 메탄가스 발생량

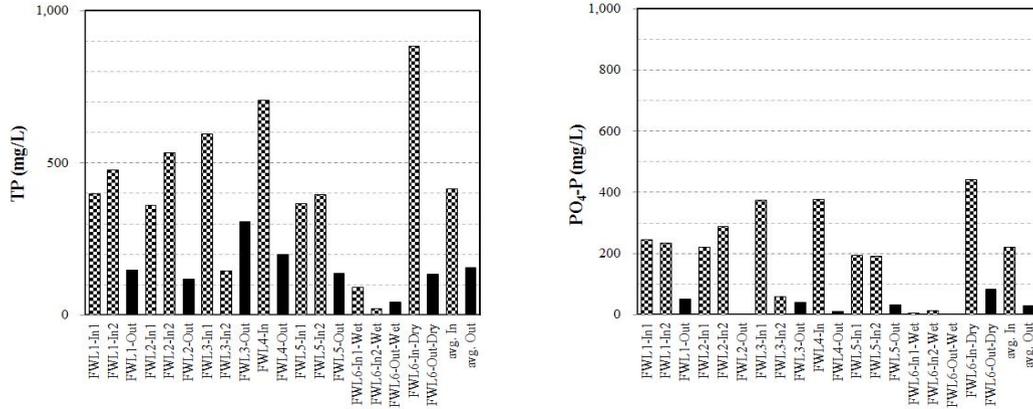
이론적 메탄생성물은 [Table 6]과 같다. 음식물류폐기물의 CODcr는 VS 보다 평균 1.38배 높게 산출되었다. CODcr/VS는 음식물류폐기물의 영양성분별 탄수화물((C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>) 1.19, 단백질(C<sub>5</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>2</sub>) 1.42, 지방(C<sub>57</sub>H<sub>104</sub>O<sub>6</sub>) 2.90로 나타났다.

CODcr 기준 메탄생성물은 영양성분별 차이가 없이 0.350 Sm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgCOD이며, VS 기준 메탄생성물은 영양성분별로 탄수화물이 0.415 Sm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS, 단백질이 0.496 Sm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS, 지방이 1.014 Sm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS로 나타났다.

음식물류폐기물 바이오가스화 시설 7개소를 대상(현장 실측 데이터 활용)으로 건조가스 및 표준상태(0 °C, 1기압)로 메탄생성물 실측치를 산출하였다[Table 7]. VS 기준 메탄생성물은 평균 0.36 Sm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS로 실측되었고, 평균 분해율(74.6 %)을 감안하여 실측치/유기물분해율은 이론치와 같은 0.48 Sm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS인 것을 알 수 있다. CODcr 기준 메탄생성물은 평균 0.25 Sm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgCOD으로 실측되었으며, 평균 분해율(77.4 %)을 감안할 경우 0.32 Sm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgCOD로 실측치/분해율이 산출되었다.



[Fig. 8] Nitrogen(TN, NH<sub>3</sub>) in the food waste.



[Fig. 9] Phosphorus(TP, PO<sub>4</sub>-P) in the food waste.

[Table 6] Theoretical Methane Production Rate of the Food Waste Based on COD<sub>Cr</sub>, VS

성분	조성식	COD/VS g-COD/g-VS	메탄생성률 Sm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg <sub>VS</sub>	메탄생성률 Sm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg <sub>COD</sub>	메탄 함량 %
탄수화물* 14	(C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>n</sub>	1.19	0.415	0.350	50
단백질***	C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	1.42	0.496	0.350	50
지방*	C <sub>57</sub> H <sub>104</sub> O <sub>6</sub>	2.90	1.014	0.350	70
계***		1.38	0.483	0.350	

\* Angelidaki, I and Sanders, W., Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants, Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2004, Vol. 3, 117-129.

\*\* 단백질의 질소는 NH<sub>3</sub>로 전환됨

\*\*\* 바이오가스화 시설에서 처리되는 음식물류폐기물의 성분별 평균 물비를 적용한 것임

질량비율 - 탄수화물 : 단백질 : 지방 = 0.464 : 0.261 : 0.275

물 비율 - 탄수화물 : 단백질 : 지방 = 0.522 : 0.421 : 0.057

실제 바이오가스화 시설에서의 메탄생성률 이론치와 실측치를 [Table 8]에 비교·정리하였다. 각각의 평균 분해율을 감안한 VS, COD<sub>Cr</sub> 기준 메탄생성률 이론치는 0.48 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kg<sub>VS</sub>, 0.32 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kg<sub>VS</sub>로 이론치와 유사한 값을 보였다. VS와 COD<sub>Cr</sub> 기준 메탄생성률은 상관관계(R=0.838)가 매우 유의미하게 나타난다.

### 3.4 시설진단 결과

#### 3.4.1 소화조 운영현황 분석(총괄)

음식물류폐기물 바이오가스화 시설 10개소를 대상으로 소화조 운영현황을 분석하였다. 당시 조사대상 시설 10개소 중 3개소(B, C, G)의 소화조 운전효율이 기준치(검사기준)에 미달하는 것으로 나타났다. 메탄가스 함량의 경우 모든 시설이 평균 60 % 이상으로 기준을 만족하였으며, pH 또한 6 < pH < 8.5 이내로 모든 시설이 기준값을 만족하였다.[Table 9]

[Table 7] Measured Methane Production Rate of the Food Waste Based on COD<sub>Cr</sub>, VS

시 설	VS** (%)	COD <sub>Cr</sub> *** (mg/L)	메탄생성률(A)**** (Sm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg <sub>VS</sub> )	메탄생성률(B)**** (Sm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg <sub>COD</sub> )
A	6.2	131,155*	0.47	0.24
B	6.1	92,305*	0.39	0.27
C	2.6	-	0.32	-
D	6.8	83,166	0.40	0.32
E	6.3	79,361	0.36	0.25
F	4.0	62,160	0.19	0.14
G	11.3	161,569	0.40	0.28
실측치	6.2	101,619	0.36	0.25
실측치/분해율*****	-	-	0.48(=0.36/0.746)	0.32(=0.25/0.774)

- \* 음식물류폐기물 바이오가스화 7개 시설 경우를 기준으로 함
- \*\* VS은 정상운전 기간 중(2~7개월)에 현장 시설에서 분석한 1일 평균치로 함
- \*\*\* COD<sub>Cr</sub>은 1회 시료채취(14.5.26~6.13, 국립환경과학원)의 분석 자료임
- \*\*\*\* 건조가스 및 표준상태(0℃, 1기압) 기준임
- \*\*\*\*\* 100 % 분해 가정시 실측치를 근거로 한 추정치임(분해율은 VS 경우 74.6 % 이고, COD<sub>Cr</sub> 경우 77.4 % 적용)

[Table 8] Comparison of Theoretical & Measured Methane Production Rate

구분	VS** (%)	COD <sub>Cr</sub> *** (mg/L)	메탄생성률(A)**** (Sm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg <sub>VS</sub> )	메탄생성률(B)**** (Sm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg <sub>COD</sub> )
실측치	6.2	101,619	0.36	0.25
이론치			0.48	0.35
실측치/분해율*****	-	-	0.48(=0.36/0.746)	0.32(=0.25/0.744)

- \* 음식물류폐기물 바이오가스화 7개 시설 경우를 기준으로 함
- \*\* VS은 정상운전 기간 중(2~7개월)에 현장 시설에서 분석한 1일 평균치로 함
- \*\*\* COD<sub>Cr</sub>은 1회 시료채취(5.26~6.13, 국립환경과학원)의 분석 자료임
- \*\*\*\* 건조가스 및 표준상태(0 °C, 1기압) 기준임
- \*\*\*\*\* 100 % 분해 가정시 실측치를 근거로 한 추정치임(분해율은 VS 경우 74.6 % 이고, COD<sub>Cr</sub> 경우 77.4 % 적용)

[Table 9] Efficiency and safety status of bio-gasification facilities

시설	운전효율 (처리효율)			운전 안정성***			체류시간 (일)
	메탄생성률* (Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgVS)	유기물 분해율(%)	메탄함량 (%)	pH	온도	유기물부하율 (kgVS/m <sup>3</sup> ·일)	
A	0.54(건식)	41.4(건식)	60.1	8.1(±0.2)	39.4(±2.0)	4.1(건식) (성능기준 4.5)	36.4 (성능기준 30)
B	0.10	61	-	7.1	32.6 (21.2~38.6)	0.45	26.5 (성능기준 20)
C	0.52(건식) 0.25(습식)	61.4(건식) 55.2(습식)	61.8(건식) 73.6(습식)	8.3(건식) 8.2(습식)	38.0 (32~42,건식) 31.9(습식)	2.0(건식) 3.5(습식)	102.7(건식, 성능기준36.5), 9.4(습식, 성능기준 7.0)
D	0.53	80.6	64	7.6(±0.3)	54.6 (±0.8)	3.1	22(성능기준18일)
E	0.55(건식) 0.47(습식)	60(건식) 79.2(습식)	66.3	8.2(±0.1)	37.2 (36~38)	4.9(건식) 2.2(습식)	38.4(건식, 성능기준 30), 12.6(습식, 성능기준 11)
F	0.62	74.5	63.0	7.6(±0.3)	39.5(±0.3)	1.8	35(성능기준 24)
G	0.18	77.9	62.4	7.8(±0.1)	52.8(±0.9)	1.7	40.5 (성능기준 24)
H	0.47	73.8	60.3	8.1(±0.3)	33.6(±1.6)	1.1	35(성능기준 25)
I	0.52	79.5	63.8	7.9(±0.2)	36.5(±2.0)	2.2	27.5 (성능기준 20)
J	0.53	82	66.3	7.6(±0.2)	39(±0.9)	4.6 (성능기준 4.8)	35(성능기준 24)
검사 기준**	0.35 이상	65 % 이상	60 % 이상	6<pH<8.5			30일 이상 또는 성능기준 준수

\* 실온상태임

\*\* 검사기준은 폐기물처리시설 세부검사방법에 관한 규정(환경부고시 제2013-56호) 의한 기준치15

\*\*\* 적정 운전안정성 범위 : pH 변화폭 ±1 이내, 온도 변화폭 3~4℃ 이내, 용적부하율 4.0 kgVS/m<sup>3</sup>·일 이내

### 3.4.2 기술진단 결과

#### 3.4.2.1 고효율 시설이며 안정적인 운영시설 (D, F, H)

D, F, H 시설은 메탄생성(습윤가스, 실온) 0.50 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/KgVS(검사기준 : 0.35) 이상, 유기물 분해율(VS 기준) 70 %이상(검사기준 : 0.65 %)으로 나타났다. 또한 소화조의 온도와 pH를 적정하게 유지하며, 유기물부하율 4.0 kgVS/(m<sup>3</sup>·일) 이하로 안정적인 운전 결과를 보였다.

#### 3.4.2.2 고효율 시설이나 운영개선이 필요한 시설(E, I, J)

E, I, J 시설은 메탄생성률 0.50 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS 이상, 유기물분해율 70 % 이상의 고효율이나 안정적인 운영을 위한 운영개선이 필요한 곳으로 조사되었다. 특히, E, J는 용적부하율 관리, I는 휘발성지방산 관리를 통한 안정적인 운영이 필요한 것으로 나타났다.

#### 3.4.2.3 계절적 변동요인을 고려 운영개선 필요시설(D, E, A)

D, E, A 시설은 유입물의 계절적 변동으로 시설 운영시 주의 깊은 운전이 요구되는 곳으로 나타났다. D는 여름철 산발효조 운영개선, A는 겨울철 결빙된 음식물류폐기물 해빙이 필요하며, A

와 E는 겨울철 반입폐기물의 높은 총고형물을 감안하여 용적부하율을 관리하여야 한다.

#### 3.4.2.4 운전효율이 낮고 운영개선이 필요한 시설(B, C)

B, C 시설은 소화조의 온도, pH, 유기물부하율을 안정적으로 운영할 필요가 있는 곳으로 나타났다. B의 경우 유기물부하율(0.45 kgVS/(m<sup>3</sup>·일))을 과도하게 낮게 운영되고 운영 기초자료가 기록·유지되지 않아 기술진단이 곤란하며, C 시설은 운전인자(온도, pH) 변동 폭이 크고 유기물부하율이 너무 높아 적정 범위 내에서 관리하여야 한다.

#### 3.4.2.5 설비의 결함이 있는 시설(A, G, H)

A, G, H 시설은 전처리 시설의 부족으로 균질한 투입량 조절이 어려우므로 저장조의 추가 설치가 필요한 것으로 보인다. G 시설은 소화조 교반기의 역방향 시공은 고쳤으나 공회전되고 있는 메탄발효조 교반기를 수리할 필요가 있다. 그리고 H 시설은 소화조 운전은 정상적이거나 잦은 고장을 발생시키는 전처리 시설(파봉·파쇄, 선별 등)을 교체할 필요가 있다.

### 참고문헌

1. 환경부, 폐기물 에너지화사업의 경제성 분석 연구, (2008).
2. 환경부, 2012 전국폐기물 발생 및 처리현황, (2013).
3. 환경부, 음식물류폐기물 처리시설 발생폐수 옥상처리 및 에너지화 종합대책[2008~2012], (2007).
4. Weiland, P., "Biogas production: current state and perspectives, Applied Microbiological Biotechnology"85. pp. 849 ~ 860 (2010).
5. 환경부, 폐기물공정시험방법, (2014).
6. 환경부, 식품공정시험방법, (2012).
7. 환경부, 수질오염공정시험방법, (2014).
8. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Standard methods for the examination of water and wastewater, 22nd ed. Washington, USA, (1998).
9. Buswell, A. M. and H. F. Mueller, H. F., "Mechanism of methane fermentation", Industrial and Engineering Chemistry, 44(3), pp. 550 ~ 552 (1952).
10. Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S., Integrated solid waste management, McGraw-Hill, (1993).
11. 이동진, 독일의 바이오가스 생산 및 이용지침서 번역본, 국립환경과학원 (2014).
12. 이동진, 일본의 메탄가스화 시설장비 매뉴얼 - 음식물류폐기물을 중심으로 번역본, 국립환경과학원 (2014).
13. 이동진, 미국의 혐기성 슬러지 소화 운영 매뉴얼번역본, 국립환경과학원 (2014).
14. Angelidaki, I and Sanders, W., "Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants", Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 3, pp. 117 ~ 129 (2004).
15. 환경부, 폐기물처리시설 세부 검사방법에 관한 규정, (2011).
16. WPCF, Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants, Manual of Practice No 11, 2nd ed., (1990).
17. Oechsner, Hans, Europäische patentanmeldung patentblatt, Anmeldenummer, 49, (2008).
18. Sahn, H, Biologie der methanbildung, chemie-ingenieur technik, 53, Nr. 11. (1981).
19. Her, Jiunn-Jye. and Huang, Ju-Sheng., "Influences of carbon source and C/N ratio on nitrate/nitrite denitrification and carbon breakthrough", Bioresource Technology, 54(1), pp. 45 ~ 51 (1995).
20. Natuscka, M. and Lee, T. W., "The different carbon sources on respiratory denitrification

in biological wastewater treatment, Journal of Fermentation and Bioengineering”, 82(3), pp. 277 ~ 285 (1996).

21. Srinandan, C. S., Glen, D., Srivastava, N., Nayak, B., “Anuradha S. Nerurkar, Carbon

sources influence the nitrate removal activity, community structure and biofilm architecture”, Bioresource Technology, 117, pp. 292 ~ 299 (2012). 