

## 하수슬러지와 음식폐기물의 단상 혐기성 통합 소화 처리 시 고춧가루 함량 변화가 바이오 가스 생산에 미치는 영향

§이 병 선

(주)포스벨

### Biogas Production Effect by addition of Red Pepper Powder through Single Stage Anaerobic Co-Biogasification of Mechanically Pre-treated Food Waste and Primary Sewage Sludge Mixture

§Byung Sun Lee

FORCEBEL Co., Ltd.

#### 요 약

본 연구는 항진 항균 작용이 보고되어진 고춧가루 함량(0%~1%)에 따른 음식물쓰레기와 하수슬러지 혼합 물질(1:5 V/V%)의 혐기성통합소화 효과를 평가하기 위하여 수행되었다. 본 연구에서 고춧가루 함량 변화가 혐기성미생물 중 가수분해균과 메탄생성균보다 산생성균에 영향을 더 큰 줄 수 있음을 보였으며, 고춧가루함량이 가장 낮은 CAP0 (Capsaicin 0)에서 실험적 누적 메탄수율(ECMY)과 실험적 바이오생산량(EBEP)이 각각 0.17 L CH<sub>4</sub>/g VS<sub>fed</sub>와 1,465 cal/g VS<sub>fed</sub>로 최고값으로 측정되어졌다. 그리고 고춧가루 함량이 증가함에 따라 정상운전 위하여 혐기성미생물의 순응을 위한 기간이 필요함을 보였다.

**주제어** : 단상혐기성소화, 통합바이오가스화, 음식물쓰레기, 하수슬러지, 고춧가루

#### Abstract

This study has been conducted to evaluate the effects of a single stage anaerobic co-biogasification of food waste and primary sewage sludge mixture (1:5 V/V%) according to mixing ratio (0%:CAP0, 0.5%:CAP0.5, 1%:CAP1.0) in red pepper powder, which was reported as the material anti-bacterial and anti-fungi, under mesophilic condition (35°C). during 31 days. It showed that red pepper powder effected anaerobic bacteria, Especially, Hydrolytic bacteria and methanogenic bacteria was inhibited much more than Acetogenic bacteria with red pepper powder. at CAP0, Experimental cumulative methane yield (ECMY) and Experimental bio-energy production (EBEP) were 0.17 L CH<sub>4</sub>/g VS<sub>fed</sub> and 1,465 cal/g VS<sub>fed</sub> individually as the highest value during 31 days.

**Key words** : Single stage anaerobic digestion, Co-Biogasification, Food waste, Sewage Sludge, red pepper powder

· Received : December 20, 2016 · Revised : January 9, 2017 · Accepted : January 26, 2017

§ Corresponding Author : Byung Sun Lee (E-mail : [globalcorea@naver.com](mailto:globalcorea@naver.com))

Department of Research Institute, FORCEBEL Co., Ltd., 496, Mado-ro, Mado-myeon, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, 18543, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서 론

2014년 현재 우리나라에서 음식물쓰레기는 일일 약 13,222 ton(전체 생활쓰레기 발생량 중 27.4%), 하수슬러지는 연간 약 3,654,237 m<sup>3</sup>의 많은 양이 발생하고 있으며 이에 대한 적절한 처리가 필요한 실정이다.<sup>1,2)</sup> 그러나 음식물쓰레기의 경우, 2005년부터 음식물쓰레기의 직접매립이 금지되고, 소각·퇴비화·사료화·소멸화 처리 후 발생되는 잔재물만을 매립하도록 법제화되었으나 우리나라 음식문화 특성상 음식물쓰레기의 염분(약 1~5%)과 수분함량이 높고, 쉽게 부패되며, 발열량이 낮아 퇴비화 및 소각처리에 어려움을 겪고 있을 뿐만 아니라 사료화의 경우도 광우병 사건 이후 음식물쓰레기로 만든 사료의 수요처가 전무한 실정이다.<sup>3,4)</sup> 하수슬러지(유기성오니 포함), 역시 2000년에 직매립이 금지된 이후, 런던협약 '96의정서의 발효와 함께 하수슬러지처리의 대부분을 차지하던 해양배출이 2012년부터 전면적으로 금지될 계획에 있어, 음식물쓰레기와 하수슬러지의 적절한 처리 및 재활용을 위한 방법 모색이 시급한 상황이다.<sup>5)</sup>

이에 따라 혐기성소화 공정(메탄 발효)은 석탄 등 화석연료의 대체에너지원으로 CH<sub>4</sub> 등의 바이오가스를 획득할 수 있으며, 퇴비화 공정에 비해 슬러지 생산량이 10%에 불과하다는 매력적인 장점 때문에 많은 연구자들의 주목을 받고 있다. 그러나 음식물쓰레기의 경우, 바이오 가스로 전환 가능한 생분해성유기물질이 다량 함유되어 있지만, 섬유소, 리그닌 등의 난분해성 물질이 많이 포함되어 있어 분해속도가 느리고, 다량의 공정슬러지가 발생하며, 높은 염분 농도와 영양불균형 등으로 혐기성처리에 한계가 있다.<sup>6)</sup> 하수슬러지의 경우, 역시 다양한 미량원소와 미생물들이 포함되어 있지만, 낮은 유기물함량과 제거효율저하, 공정 슬러지 및 폐수 등의 문제점을 수반하고 있다.<sup>7)</sup>

최근 들어 현재 운영 중인 하수처리장 내 혐기성소화조의 여유용량을 이용하여 음식물쓰레기와 하수슬러지를 통합하여 이런 문제점을 해결하고자 다양한 연구가 진행 중에 있다. 특히, 음식물의 조리과정에서 염분과 같은 양념류 첨가는 혐기성 소화공정에서 혐기성미생물의 세포 탈수를 유발하여 혐기성미생물의 성장을 저해하고 혐기성소화 효율에 악영향 미치므로 이에 대한 많은 연구가 진행되고 저해에 대한 개선 방안이 논의 되어졌다.<sup>8-10)</sup>

그러나 염분과 더불어 우리나라에서 가장 선호하는

양념류인 고춧가루는 국민 1인당 소비량이 4 kg/year로 세계최고 수준이며 최근 매운 음식을 선호하는 국민기호에 따라 매년 증가되고 있는 추세이지만 고춧가루와 혐기성 소화 효율에 대한 연관성 연구는 전무한 실정이다.

특히, 고춧가루 구성성분 중 0.6~1.5%를 차지하는 매운맛 성분인 Capsaicin(C<sub>18</sub>H<sub>27</sub>O<sub>3</sub>N)은 1846년 Thresh에 의해서 처음으로 결정화 되었으며, 항균작용 및 항진균 작용이 보고되어 음식물쓰레기의 혐기성소화 시 혐기성미생물의 활성저하 요인으로 작용할 우려를 낳고 있다. 그러나 이와는 반대로 최근 김치 제조에 대한 연구에서 김치 제조시 고추 첨가는 단백질, 지질, 탄수화물은 물론 칼슘, 인, 철분 등의 다양한 성분이 들어 있어 젖산균의 발육을 도와 산생성을 돕는 연구가 진행되었다.<sup>11,12)</sup> 이에 따라 음식물쓰레기와 하수슬러지를 통합하여 혐기성 소화처리 하는 경우, 음식물쓰레기에 함유된 고춧가루가 혐기성소화 운전에서 어떤 영향을 미치는가에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 기계식 전처리된 음식물쓰레기(Grinded Food waste, GFW)와 1차 침전슬러지(Primary sewage sludge, PSS)를 대상으로 단상혐기성통합 소화공정 처리 과정에서 효과적인 바이오가스 회수를 위하여 음식물쓰레기에 함유된 향균 및 항진균 등의 작용이 알려져 있는 고춧가루 함량 변화가 혐기성단계별 관여 미생물과 바이오가스의 생산에 어떤 영향을 미치는가를 평가하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 실험 재료

본 연구에서는 혐기성소화의 운전특성을 평가하기 위하여 음식물쓰레기와 하수슬러지를 사용하였으며, 실험 전 K대학교 학생식당과 J하수처리장 내 1차침전조에 침전된 슬러지를 농축조로 이송하는 과정에서 직접 채취하여 사용하였다. 특히, 생분해성물질이 다량 함유된 1차 침전슬러지는 음식물쓰레기의 염분회석과 부족한 미량원소 보충을 위하여 선정되었다. 또한, 혐기성반응기의 미생물 접종(seeding)을 위하여 혐기성 슬러지를 탈수공정으로 이송하기 전에 저류조에서 채취하여 10 mesh 체(Φ2 mm)로 걸러 불순물만을 제거한 후 혐기성 슬러지 특성의 변화 없이 원상태로 실험에 이용하였다. 고춧가루는 재래시장에서 판매하는 일반적인 청랑고춧가루를 구입하여 사용하였다.

2.2. 실험 장치 및 방법

2.2.1. 실험 장치 및 운전

본 연구에서 사용된 음식물쓰레기와 하수슬러지 바이오 가스화 실험 장치는 2단계로 구성되어 있다. 1단계 기계적 처리장치(Mechanical Treatment, MT)는 분쇄기(가정용 분쇄기, Model, HMF-1000)와 탈수기(Φ2 mm 가정용녹즙기 Model, DH-850)로 구성하였다. 2단계 생물학적처리장치(Biological Treatment, BT)는 Fig. 1과 같이 온도센서 부착형 열풍기(Model, RST-570)를 장착한 밀폐형 항온조 내에 아크릴로 제작한 4 set의 Batch Style 반응기(Φ15 cm × 35 cm, 유효체적 6 L(운전 유효체적 4.5 L))와 교반 장치(SPG GRARED Moter, Model, S812 5GB × 2set; Panasonic Moter, Model, M91A40GV4Y × 2set)를 설치하였으며, 시료측정을 위하여 시료채취구, 온도측정구, 및 가스포집구 등을 별도로 설치하였다. 또한, 혐기성소화에서 발생된 바이오 가스포집을 위하여 Teflon bag(10L)을 사용하였다. 특히, 빛(光)에 대한 광합성균의 영향을 최소화 하기 위하여 외부차단막을 설치하였다.

실험장치 운전은 1단계 기계식처리장치에서 음식물쓰레기와 하수슬러지를 혼합 분쇄한 후 탈수하여 탈수액(Φ2 mm 이하)을 회수하였다. 이 탈수액을 2단계 생물학적처리장치에 투입하고, 중온소화조건(35 ± 1°C)에서

교반(60 ± 5 rpm)하여 완전혼합 상태를 유지하였다. 특히, 혐기성 반응조와 교반기의 회전부에 Watersealing을 실시하여 외부와 가스교환 상태를 차단하여 완벽한 혐기성상태를 유지하여 메탄생성균의 활성상태를 최적으로 유지시켰다. 또한, J하수처리장에서 혐기성소화슬러지를 직접 채취하여 10 mesh sieve (2 mm)로 불순물을 제거한 후 혐기성미생물접종을 실시하였다. 혐기성반응기의 운전기간은 중온성소화조의 전형적인 운전기간인 20 ~ 35일을 고려하여 각 영향인자에 따라 31일 동안 회분식 운전을 수행하였다.

2.2.2. 실험 방법

본 연구에서는 음식물쓰레기와 하수슬러지의 통합 혐기성소화과정에서 음식쓰레기에 함유된 고춧가루의 함량변화에 따른 바이오가스 생산에 효율을 평가하기 위하여 실험을 다음과 같이 수행하였다. 우선 음식물쓰레기를 분쇄하고, 분쇄된 음식물쓰레기(Grinded food waste, GFW)와 1차 침전슬러지(Primary Sewage sludge, PSS)를 부피비 기준으로 1 : 5으로 혼합·탈수하여 얻은 탈수액 1.5L와 혐기성소화슬러지(seeding) 3 L를 혼합하여 4.5 L로 혐기성 연구대상 시료를 제조하였다. 또한, 홍<sup>10</sup>이 김치 연구를 위하여 첨가한 2% 농도(2 g red pepper powder/100 g 배추)를 고려하여 Table 1과 같

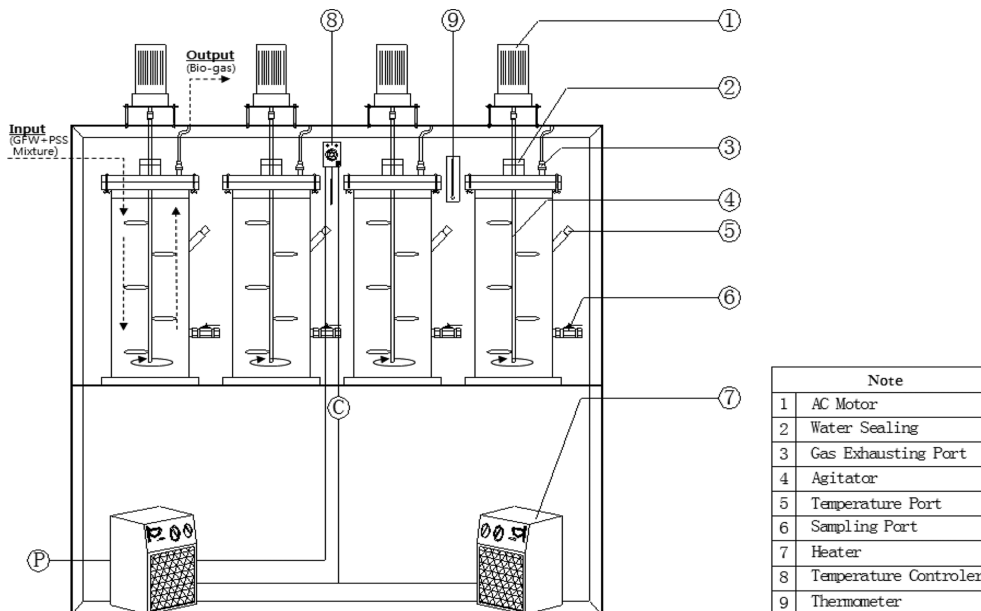


Fig. 1. A schematic of single anaerobic bio-gasification reactor for this study.

**Table 1.** Mixing conditions of red pepper powder at each anaerobic reactor

Reactor	DS <sup>1)</sup>	CAP0 <sup>2)</sup>	CAP0.5	CAP1.0
Red pepper powder mixing ratio	Digested Sludge	0.0%	0.5%	1.0%

note 1) DS : Digested sludge, 2) CAP : Capsaicin (red pepper powder)

이 고춧가루 투입량을 0% (0g red pepper powder/L), 0.5% (5 g red pepper powder/L) 1.0% (10 g red pepper powder/L)로 하고, 대상시료의 알칼리 농도를 NaHCO<sub>3</sub>/L를 투입하여 5,000 ppm CaCO<sub>3</sub> 조정한 후 연구를 수행하였다. 그리고 접종액(Seeding)인 혐기성소화슬러지(DS)의 영향을 파악하기 위하여 동일 조건에서 대조실험을 수행하였다.

시료 채취는 가수분해와 비교적 빠르게 진행되는 산발효단계의 영향을 평가하기 위하여, 0일 ~ 4일은 1회/일로, 5일 ~ 31일은 1회/3일 간격으로 총 13회에 걸쳐 소화슬러지를 25ml/회씩 채취하였다.

음식물쓰레기와 1차 침전슬러지의 성분분석 및 삼성분분석은 폐기물공정시험법에 따라 측정하였으며, 원소분석은 CHNS-932 Determinators를 이용하여 분석하였다. 단상혐기성소화조의 운전특성 평가를 위하여 TS (Total solid), VS (Volatile solid), TCODcr, SCODcr, VFA (Volatile fatty acid), Alkalinity (pH 4.5), NH<sub>3</sub>-N, NaCl, 온도, pH, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, 가스발생량을 측정하였다. TS 및 VS는 폐기물 공정시험법에 준하여 수행하였으며, TCODcr와 SCODcr는 Closed Reflux, Titrimetric Method, Alkalinity는 Wastewater Standard Method 403에 준하여 분석하였다. VFA는 Table 2와 같은 조건에서 GC 5890-II를 이용하여 정량 및 정성분석 하였으며, 분석된 모든 VFA 농도를 COD농도로 환산하여 TVFA 농도로 표시하였다.

pH와 NH<sub>3</sub>-N는 수질공정시험법으로 NaCl은 Mercuric

Thiocyanate Method에 따라 DR2000으로 분석하였다. 가스발생량은 10 L Teflon bag에 포집된 가스를 삼방코그가 장착한 50 ml 실린지를 이용하여 직접 측정하였다. 가스성분(CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>)은 직접 반응조 내 발생가스를 GA2000(CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub> 분석 : Dual wavelength infrared cell, O<sub>2</sub> 분석 : Internal electrochemical cell)로 분석하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. 시료 물리화학적 특성

분쇄된 음식물쓰레기(Grinded food waste, GFW)와 1차 침전슬러지(Primary Sewage sludge, PSS)를 대상으로 단상혐기성통합 소화공정 처리 과정에서 음식쓰레기에 함유된 향균 및 항진균 등의 작용이 알려져 있는 고춧가루 함량 변화가 혐기성단계별 관여 미생물과 바이오가스의 생산에 어떤 영향을 미치는가를 연구하였다. 본 연구에 사용된 음식쓰레기와 1차 침전슬러지의 물리화학적 특성은 Table 3, 4와 같다.

음식쓰레기의 경우, 곡물류가 약 44.9%, 어육류가 약 49.8% 및 야채와 채소류가 약 5.3%로 조사되었다. 박<sup>14)</sup> 또는 국립환경연구원<sup>15)</sup>의 연구에 따르면, 음식물쓰레기의 조성은 채소류가 평균 약 51.1%로 가장 높으며, 곡물류가 약 29.7%, 어육류가 약 12.8% 및 기타 성분이 약 6.3%로 조사되었다. 또한, 음식쓰레기의 수분이 평균 약 79.8%, 가연분이 약 15.0%, 회분이 약 5.2%로 조사되어졌으며, C/N 비는 11.3 ~ 15.6의 범위를 보였다. 이를 본 연구에서 사용되어진 음식물쓰레기특징과 비교하여 보면 채소류에 비하여 곡물류 및 어육류의 함량이 높은 것으로 조사되었다. 하수슬러지의 경우, TS가 약 2.6%, VS가 약 1.6%, VS/TS는 약 64.7%, C/N 비는 약 8.2으로 조사되었다. 이전 연구에서 김 등<sup>16)</sup>은 D시 농축조의 1차 침전슬러지의 TS가 2.4 ~ 3.1%, VS가 1.20 ~ 2.0%, VS/TS는 64.2%(평균), C/N 비는 7.2로 보고하였으며, 본 연구에서 사용되어지는 1차 침전슬러지 성상이 이전 조사되어진 범위 안에 있음을 보였다.

**Table 2.** Analytical conditions of VFA gas chromatography

Column	Zebtron ZB-FFAP (Polar)
Dimensions	30 m × 0.32 mm × 0.25 μm
Detector	FID (Flame Ionization Detector)
Injection Temp.	Split 20 : 1@250°C, 1 μl
Oven Temp Program	100°C (2 min), 8°C/min to 250°C (30 min)
Detector	FID@350°C
Carrier Gas	Helium 35 cm/sec@100°C

**Table 3.** Component of food waste

Component	Content (% wet base)
Grain	44.9
Fish·Meat	49.8
Vegetable·Fruit	5.3

**Table 4.** Physicochemical property of Grinded food waste and primary sewage sludge

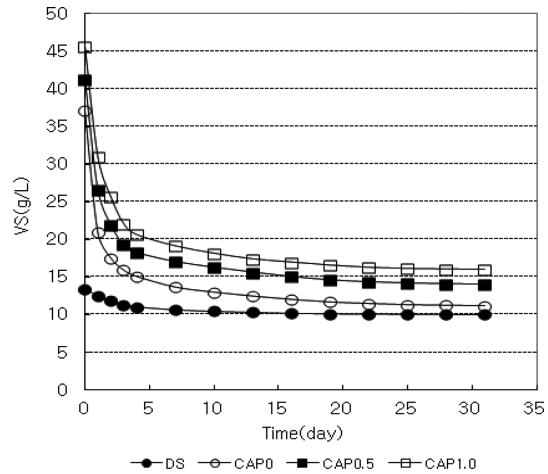
Items	Food waste	Primary sewage sludge
pH	6.1	5.8
Water content(%)	80.9	97.4
Bulk density(g/cm <sup>3</sup> )	1.3	-
Alkalinity(mg/L)	1,086	678
NaCl(mg/L)	2,200	450
TS(% dry base)	19.0	2.6
VS(% dry base)	20.6	1.6
VS/TS(% dry base)	77.1	61.5
Element analysis(% dry base)		
C	52.0	43.2
H	7.1	6.6
O	36.1	44.9
N	4.6	5.2
S	0.01	0.01
C/N	11.1	8.3

**3.2. 가수분해평가**

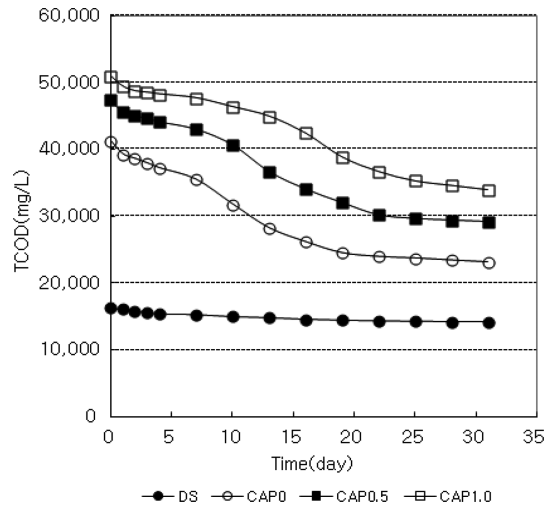
혐기성소화의 가수분해평가는 고춧가루 함량 변화가 율속단계(rate-limiting step)인 가수분해단계에 어떤 영향을 미치는가를 평가하기 위하여 수행되었다. 본 연구에서 DS, CAP0, CAP0.5, CAP1.0의 초기 VS는 Fig. 2와 같이 각각 13.5 g/L, 37.1 g/L, 41.3 g/L, 45.7 g/L로 31일 운전 후 10.0 g/L, 11.2 g/L, 14.0 g/L, 16.0 g/L로 VS분해율이 각각 25.7%, 69.8%, 66.0%, 65.0%로 고춧가루의 첨가량이 증가함에 따라 VS 분해율이 다소 감소하였다. 본 연구결과 고춧가루 함량이 가장 적은 CAP0에서 69.8%로 VS 분해율이 가장 높게 나타났다.

TCOD의 경우, Fig. 3와 같이 DS, CAP0, CAP0.5, CAP1.0의 초기 TCOD는 각각 16,278 mg/L, 41,200 mg/L, 47,370 mg/L, 50,890 mg/L이며, 31일 운전 후 14,192 mg/L, 23,130 mg/L, 29,206 mg/L, 34,002 mg/L로 TCOD 분해율은 각각 12.8%, 43.8%, 38.3%, 33.1%로 나타났다. 본 연구결과 고춧가루의 첨가량이 증가할수록 TCOD 분해율이 감소하는 경향을 보였다.

SCOD의 경우, Fig. 4와 같이 DS, CAP0, CAP0.5, CAP1.0의 초기 SCOD는 각각 977 mg/L, 4,944 mg/L,



**Fig. 2.** Variation of VS at various red pepper powder mixing ratio.



**Fig. 3.** Variation of TCOD at various red pepper powder mixing ratio.

4,974 mg/L, 5,089 mg/L이었으며, DS, CAP0 및 CAP0.5의 경우는 운전 1일에 각각 1,427 mg/L, 18,789 mg/L 및 17,540 mg/L로 고춧가루 함량이 가장 높은 CAP1.0의 경우, 운전 3일에 17,557 mg/L로 최고값을 보였다. 그 후 지속적으로 감소되어 운전 31일에 DS, CAP0, CAP0.5, CAP1.0가 각각 78 mg/L, 143 mg/L, 526 mg/L, 2,764 mg/L로 감소되었다.

본 연구결과, 고춧가루함량이 증가할수록, 가수분해단계에서 유기성물질이 수화·용출되어 생성되는 SCOD<sub>max</sub>가 감소하며, SCOD<sub>max</sub>에 도달시간도 역시 지체됨을 보

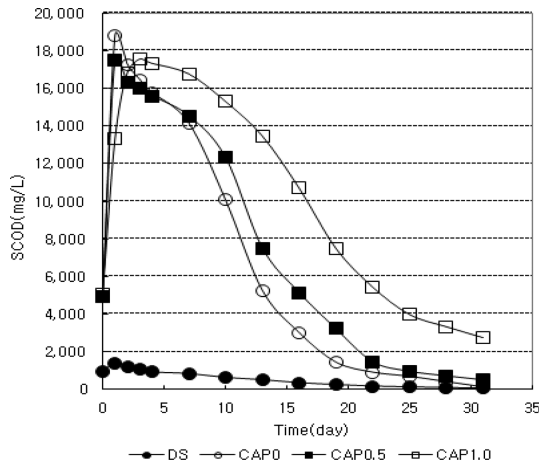


Fig. 4. Variation of SCOD at various red pepper powder mixing ratio.

였다. 이는 고춧가루의 항균작용이 가수분해균의 활성을 저해한 영향으로 사료된다.

가수분해균의 활성을 평가하기 위하여  $SCOD_{max}$ 와 SCOD증가율을 측정하였다. DS, CAP0 및 CAP0.5의 경우,  $SCOD_{max}$ 와 SCOD증가율이 운전 1일에서 각각 1,427 mg/L, 18,789 mg/L 및 17,540 mg/L와 46.0%, 280.0% 및 252.6%로 측정되었으며, CAP1.0의 경우는 3일에서 17,557 mg/L, 245.0%로 측정되었다. 이를 통하여 고춧가루첨가량이 증가할수록 가수분해균의 활성이 저하되며,  $SCOD_{max}$ 에 도달시간이 지체되어, 가수분해에 의한 SCOD증가율이 감소하는 것으로 사료된다.

$$SCOD \text{ 증가율}(\%) = \frac{(SCOD_{max} - SCOD_0)}{SCOD_0} \times 100 \quad (1)$$

where,  $SCOD_{max}$  : maximal SCOD  
 $SCOD_0$  : initial SCOD

또한, pH 변화는 혐기성미생물의 저해를 예측할 수 있는 가장 간단한 지표이다. Fig. 5와 같이 DS, CAP0, CAP0.5, CAP1.0의 초기 pH는 7.5, 7.1, 7.0, 7.0로 측정되어 혐기성소화 최적범위를 나타내었다. DS, CAP0와 CAP0.5는 운전 1일에 7.5, 6.6과 6.4, CAP1.0은 운전 3일에 5.8까지 감소하는 것으로 측정되었다.

이는 고춧가루 농도가 증가함에 따라 가수분해와 산생성단계에서 생성된 VFA가 메탄생성균에 의하여 효과적으로 메탄으로 전환하지 못하고, 반응조내 축적되어 pH저하가 일어나기 때문으로 사료된다. 또한, 입자상유

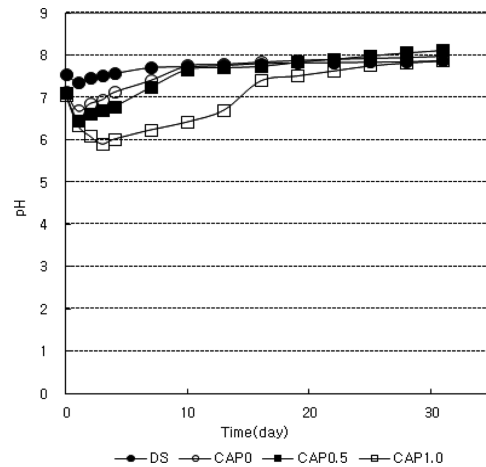


Fig. 5. Variation of pH at various red pepper powder mixing ratio.

Table 5. Variation of POS at various red pepper powder mixing ratio

Reactor	TCOD <sub>i</sub>	SCOD <sub>i</sub>	SCOD <sub>max</sub>	POS(%)
DS	16,278	977	1,427	2.9
CAP0	41,200	4,944	18,789	38.1
CAP0.5	47,370	4,975	17,540	29.6
CAP1.0	50,890	5,089	17,557	27.2

$$POS(\%) = \frac{(SCOD_{max} - SCOD_i)}{(TCOD_i - SCOD_i)} \times 100 \quad (2)$$

기물의 용해도(Particulate Organic Solubilization, POS)평가를 통하여 고춧가루 함량이 가수분해단계에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구결과, Table 5와 같이 DS, CAP0, CAP0.5, CAP1.0의 POS는 각각 2.9%, 38.1%, 29.6%, 27.2%로 고춧가루 첨가량이 가장 높은 CAP1.0일 때 가장 낮은 유기물용해도를 나타냈다. 이는 고춧가루함량의 증가가 가수분해균의 활성을 저해한 원인으로 사료된다.

### 3.3. 산성화 분율평가

혐기성 공정에서 일반적으로 입자성유기물은 가수분해균의 수화-용출 반응으로 용해성 유기물로 전환되며, 산생성균의 산생성반응으로 메탄생성균이 사용하기 쉬운 형태의 VFA로 전환된다. 산성화 분율은 산생성균이 용해성유기물을 VFA로 전환하는데 고춧가루 함량 변화가 어떤 영향을 미치는지 평가하기 위하여 수행되었다.

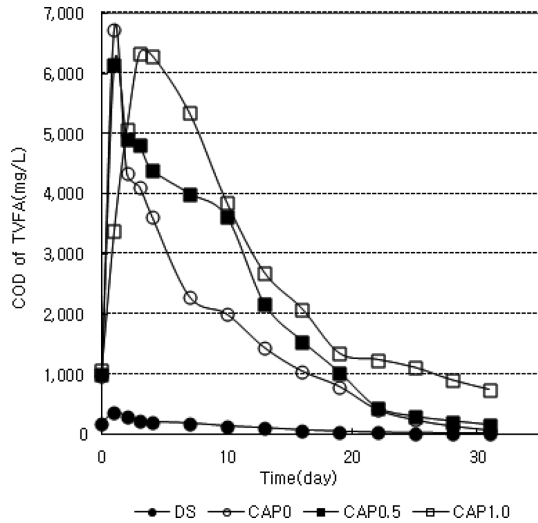


Fig. 6. Variation of TVFA at various red pepper powder mixing ratio.

그리고 각 혐기성반응조의 최고 TVFA 농도를 COD로 환산하여 TVFA<sub>max</sub> 농도로 나타내었다.

산생성균에 의하여 생성된 TVFA 농도 변화는 Fig. 6 과 같이 DS, CAP0와 CAP0.5의 경우, 초기 TVFA는 각각 186 mg/L, 989 mg/L와 995 mg/L이고, 운전 1일에 최대 374 mg/L, 6,740 mg/L 및 6,160 mg/L로 증가하였다. 이에 반하여 CAP1.0의 경우, 초기 TVFA는 1,086 mg/L이고, 운전 3일에 최대 6,331 mg/L까지 증가하였으며, 그후 운전 31일 운전 기간 동안 DS, CAP0, CAP0.5, CAP1.0의 TVFA는 메탄생성균에 의하여 CH<sub>4</sub> 전환되면서 각각 24 mg/L, 78 mg/L, 158 mg/L, 747 mg/L까지 감소하였다. 본 연구결과 고춧가루함량이 가장 높은 CAP1.0에서 TVFA<sub>max</sub>의 도달시간이 3일로 CAP0 및 CAP0.5와 비교하여 지체되었으며, pH도 5.8 까지 감소함을 보였다.

또한 가수분해단계에서 생성된 용해성유기물이 Bio-energy로 전환되어지는 양을 예측하기 위하여 산성화분율(Acidified COD)을 적용하였다. 본 연구결과, Table 6 과 같이 고춧가루 함량에 따라 TVFA<sub>max</sub>에서 CAP0, CAP0.5, CAP1.0의 산성화분율은 각각 26.1%(1일), 35.8%(1일), 35.1%(1일), 36.0%(3일)로 고춧가루 함량 변화에 관계없이 유사한 값으로 산성화분율에 대한 영향은 적은 것으로 사료된다. 고 등<sup>17)</sup>도 이전의 김치 발효에 대한 연구를 통하여 고춧가루가 젖산균의 발육을 도와 산생성을 돕는다고 보고하여 고춧가루함량이 산생

Table 6. Variation of Acidified COD at various red pepper powder mixing ratio

Reactor	COD of TVFA <sub>max</sub>	Filtered COD at TVFA <sub>max</sub>	Acidified COD(%)
DS	374	1,427	26.1
CAP0	6,740	18,789	35.8
CAP0.5	6,160	17,540	35.1
CAP1.0	6,331	17,557	36.0

$$\text{Acidified COD(\%)} = \frac{\text{COD of TVFA}_{\text{max}}}{\text{Filtered COD at TVFA}_{\text{max}}} \times 100 \quad (3)$$

성 단계에는 영향이 적음을 밝혔다. 그럼으로 Table 6 과 같이 고춧가루 함량 증가가 가수분해균의 유기물 분해와 산생성균의 산성화기간을 지체시키지만 운전이 지속됨에 따라 메탄생성균이 혐기성 반응조 내의 환경에 순응되고, TVFA의 축적 없이 원활하게 메탄으로 전환될 수 있음을 보였다.

그리고 산생성단계의 완충능력을 평가하기 위하여 측정된 VFA/Alk. 비는 Fig. 7과 같이 DS는 운전 동안 0.08이하를 나타냈다. CAP0은 초기 0.20에서 1일 후 최대 1.61 이후 31일 0.01로 측정되었다. CAP0.5는 초기 0.20에서 1일 후 최대 1.75 이후 31일 0.02로 측정되었다. CAP1.0은 초기 0.21에서 3일 후 최대 2.01 이후 31일 0.10로 측정되었다.

이는 반응기 운전이 진행됨에 따라 모든 반응기에서

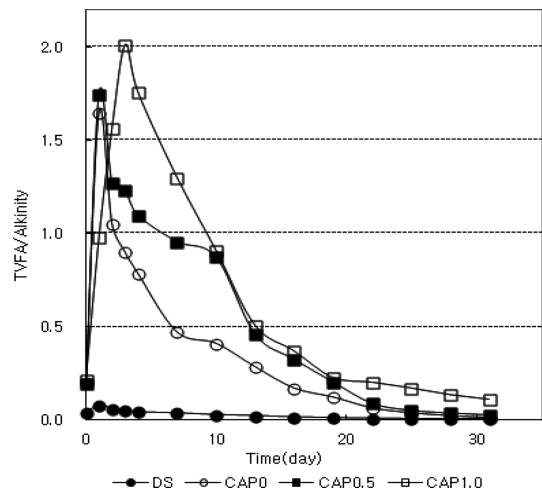


Fig. 7. Variation of TVFA/Alkalinity at various red pepper powder mixing ratio.

알칼리도가 소모되고, VFA의 축적되어 Zhao and Kugel<sup>18)</sup>이 밝힌 적적 VFA/Alk. 비 0.4 이하로 나타났으나, CAP0은 운전 10일 이후 VFA/Alk.비가 0.41 이하로, CAP0.5와 CAP1.0은 운전 13일 이후 VFA/Alk. 비가 각각 0.32과 0.37이하로 측정되어 고춧가루 함량이 낮은 CAP0에서 VFA 발생에 대한 완충능력이 빠르게 회복되었음을 보였다.

3.4. 메탄수율 평가

단상혐기성통합소화에서 바이오가스 전환을 평가하기 위하여 최대누적메탄수율 및 Bio-energy수율을 측정하였다. Table 7와 같이 운전기간 31일 동안 각 반응기의 최대누적메탄수율은 DS의 경우, 0.05 L CH<sub>4</sub>/gVS<sub>fed</sub>로 CAP0, CAP0.5와 CAP1.0의 경우, 각각 0.17 L CH<sub>4</sub>/gVS<sub>fed</sub>, 0.15 L CH<sub>4</sub>/gVS<sub>fed</sub> 및 0.13 L CH<sub>4</sub>/gVS<sub>fed</sub>로 측정되었으며, Bio-energy수율은 DS의 경우, 431 Cal/gVS<sub>fed</sub>, CAP0, CAP0.5와 CAP1.0의 경우, 각각 1,465 Cal/gVS<sub>fed</sub>, 1,293 Cal/gVS<sub>fed</sub> 및 1,121Cal/gVS<sub>fed</sub>로 측정되어져 고춧가루 함량이 낮을수록 최대누적메탄수율 및 Bio-energy 수율이 높게 측정되었다.

그러나 Fig. 8과 같이 운전종료시점 31일에서 CAP0과 CAP0.5의 CH<sub>4</sub> 발생량은 0.46L과 0.34 L로 감소하는 반면 CAP1.0은 1.0L로 지속적인 CH<sub>4</sub>의 발생이 예상되어 누적메탄수율이 개선될 것으로 사료된다. 특히, DS의 경우 전체 운전기간 동안 55.2~64.9%으로, CAP0의 경우, 10일 이후 62.1~67.6%, CAP0.5와 CAP1.0의 경우, 13일 이후 각각 61.3~64.2%, 60.6~65.8%로 고춧가루 함량에 따라 혐기성소화가 안정화되는 기간이 지체되지만 시간이 경과함에 따라 혐기성소화가 안정화 되어지는 것을 보였다.

또한, 원소분석에 의한 이론적누적메탄수율과 실험적누적메탄수율 변화율을 살펴보면 Table 8 같이 DS,

Table 7. Experimental cumulative methane yield (ECMY) & Experimental bio-energy production (EBEP) at various red pepper powder mixing ratio

Reactor	ECMY[A] (L CH <sub>4</sub> /g VS <sub>fed</sub> )	EBEP[B] (cal/g VS <sub>fed</sub> )
DS	0.05	431
CAP0	0.17	1,465
CAP0.5	0.15	1,293
CAP1.0	0.13	1,121

B=A×8,620 cal/L CH<sub>4</sub> (4)

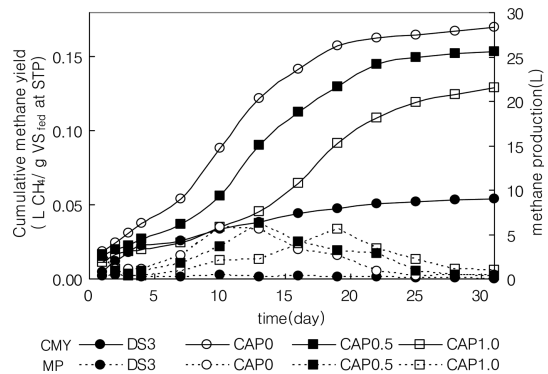


Fig. 8. Experimental cumulative methane yield (CMY) and methane production (MP) at various red pepper powder mixing ratio.

CAP0, CAP0.5 및 CAP1.0의 이론적누적메탄수율은 각각 0.22, 0.32, 0.36 및 0.40 L CH<sub>4</sub>/gVS<sub>fed</sub>이며, 실험 메탄수율은 각각 0.05, 0.17, 0.15 및 0.13 L CH<sub>4</sub>/gVS<sub>fed</sub>로 이론적 누적메탄수율 대비 24.1%, 48.9%, 42.9%, 32.2%로 측정되었다. 이는 고춧가루함량이 높을수록 VFA축적과 pH저하로 주변환경에 민감한 메탄생성균이 충격을 받아 메탄발생이 저해된 결과로 사료된다. 본 연구 결과, 고춧가루 함량 높을수록 동일한 운전 시간 조건의 경우, 누적메탄발생수율은 저하되지만, 31일 이상의 운전 조건에서는 고춧가루농도에 대한 혐기성균들의 순응이 이루어져 누적메탄수율이 개선될 수 있음을 보였다. 특히, Table 8 같이 C/N비가 7.4~8.8로 최적 C/N 비에 비하여 낮게 측정되어 혐기성균의 메탄수율 향상을 위해서 운전시간 최적화 뿐만 아니라 동시에 C/N비 조절의 적절한 조절이 필요한 것으로 사료된다.

이와 더불어 고춧가루 이외에 저해인자들의 메탄수율 평가에 영향을 검토한 결과, 염분의 경우, DS는

Table 8. Elemental composition, C/N ratio and Theoretical cumulative methane yield (TCMY) at various red pepper powder mixing ratio

Reactor	Elemental composition(dt% VS)						TCMY (L CH <sub>4</sub> /g VS fed)
	C	H	O	N	S	C/N	
DS	33.8	4.4	55.9	4.6	0.003	7.4	0.22
CAP0	42.5	5.2	46.9	5.1	0.007	8.2	0.35
CAP0.5	43.3	5.3	46.2	5.1	0.001	8.4	0.36
CAP1.0	45.4	5.8	43.5	5.1	0.005	8.8	0.40



280 mg/L, CAP0, CAP0.5 및 CAP1.0는 680 mg/L로 동일하였으며, 이 등<sup>19)</sup>이 밝힌 염분저해 농도 5,000 mg/L 보다 낮아 염분에 대한 저해작용은 없었던 것으로 사료된다. 또한 NH<sub>3</sub>-N의 경우, DS는 초기 560 mg/L에서 31일 운전 후 733 mg/L로 CAP0, CAP0.5 및 CAP1.0은 초기 367 mg/L로 동일하였으나 31일 운전 후 CAP0은 795 mg/L, CAP0.5은 894 mg/L, CAP1.0은 853 mg/L로 측정되었다. 그러나 이전에 밝힌 저해 농도 1,500 mg/L<sup>20)</sup> 이내로 측정되어 NH<sub>3</sub>-N 농도의 저해작용은 없었던 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 기계식전처리된 음식물쓰레기(GFW, Grinded Food Waste)와 1차 침전슬러지(PSS, Primary Sewage Sludge) 유기성폐기물을 바이오 가스로 전환하는 연구에서 고춧가루 함량 변화에 따른 바이오 가스화(Bio-energy)가능성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고춧가루 첨가량이 따른 VS 분해율은 고춧가루를 첨가하지 않은 CAP0에서 약 69.8%로 가장 높았으며, 고춧가루 첨가량이 증가할수록 VS 분해율이 감소하는 것으로 측정되었다.

2. 가수분해효율을 평가하기 위해 측정된 입자성물질 용해도(POS)의 경우, 역시 CAP0에서 약 38.1%로 가장 높게 평가되어 고춧가루함량이 낮을수록 가수분해효율이 높은 것으로 평가되었다. 그러나 산성화분율의 경우는 모든 반응조건에서 35.1~36.0%로 거의 동일한 수치로 측정되어 고춧가루첨가가 혐기성과정에서 산성성균보다 가수분해균과 메탄생성균에 더 큰 영향을 미칠 수 있음을 보였다.

3. 메탄생성효율을 평가하기 위해 측정된 누적메탄생성수율과 Bio-energy 생성수율의 경우, 역시 CAP0에서 0.17L CH<sub>4</sub>/g VS<sub>fed</sub>와 1,465cal/g VS<sub>fed</sub>로 최대로 측정되었다. 그러나 CAP0와 CAP0.5에서 운전 31일에서 CH<sub>4</sub> 발생량이 각각 0.46L과 0.34L로 감소하는 경향을 보이는 반면 CAP1.0에서 pH가 7.87로 혐기성반응이 안정화되고, 가스 발생량도 1.0L로 지속적으로 발생되어 지속적인 CH<sub>4</sub> 생산이 이루어 질것으로 예상된다.

4. 그러므로 고춧가루의 첨가량이 증가할수록 혐기성소화의 단계별 관여 미생물의 순응 특성을 고려하여, 운전시간을 결정하는 것이 필요한 것으로 사료된다. 그러나 혐기성소화의 순응기간이 너무 길어지면 혐기성반응

조의 크기 증가 등에 따른 시설비 및 운전비가 증가될 수 있으므로 순응기간을 줄일 수 있도록 운전방법을 모색하는 것이 필요한 것으로 사료된다.

#### References

1. MOE, 2015 : Current status of waste generation and treatment in Korea 2014, pp 20, Korea.
2. MOE, 2015 : Sewage system statistics 2014, 1, pp 14, Korea.
3. Mun Hwan Jeon, Ho Kang, 2006 : The study on Co-Digestion of food wastes and Waste Activated Sludges, the Spring conference of Korea Society of Waste Management, pp 20-24.
4. MOITE, 2002 : Development of Biogas Utilization Technologies Using Anaerobic Co-Digestion of Waste Activated Sludges and Food wastes, pp 1-3.
5. Si-Kyung Cho et al., 2010 : The Study on Efficient Combination of Various Pretreatments for Sewage Sludge Solubilization, Korea Society of Waste Management, 27(6), pp. 514-521.
6. Do Hee Kim et al., 2000 : Analysis of the Factors Affecting Anaerobic Thermophilic Digestibility of Food Wastes, Korea Organic Resources Recycling Association, 8(2), pp. 130-139.
7. Jong-Bu Park et al., 2000 : The Optimum Condition for the Co-digestion of Food waste and Sewage Sludge, Korea Organic Resources Recycling Association, 8(2), pp. 93-102.
8. Soo Hyung Kim, 2002 : A study for comparison of Characteristics By Biogas Production Rate on Livestock wastewater, Sewage Sludge and Food waste in Mixing Anaerobic Treatment, Dong-A University Master's thesis, Korea.
9. Chae Chun Jeong, 2001 : Activation Strategy for Food Waste Recycling, Korea Society of Waste Management, 18(8) pp. 22-29.
10. Jeong Hee Hong, 2003 : A study on Microbial Characteristics of Decomposing-Accelerants for Garbage Reducing Agent, Hoseo University doctorate thesis, Korea.
11. In Hee Baik, 2003, Effects of milk products on growth of lactic acid bacteria, sensory properties and volatile odor components in kimchi, Duksung Women's University Master's thesis, Korea.
12. Ja-Kyoung Hwang, 2003, Effects of side-materials on acid production and growth of lactic bacteria in Kimchi I. Duksung Women's University Master's thesis, Korea.
13. S. S. Lee, J. K. Ha, K.J. Cheng, 2000 : Relative Contributions of Bacteria, Protozoa, and Fungi to In Vitro

Degradation of Orchard Grass Cell Walls and Their Interactions, Applied and Environmental Microbiology, 66(9), pp. 3807-3813.

14. Kwang Hyun Park, 2004 : A study on the Drying Characteristics of Food waste and Sewage Sludge by Microwave, Dong-A University doctorate thesis, Korea.

15. NIER, 2004 : Establishment of Integrated Organic Waste Management Technology(I), Investigation of organic waste disposal status and characteristics, Korea.

16. Do Hee Kim et al., 2000 : Analysis of the Factors Affecting Anaerobic Thermophilic Digestibility of Food wastes, Korea Organic Resources Recycling Association, 8(2), pp. 130-139.

17. Jae Il Go, 2003 : A Study on the development of Pre-treatment technology for high efficient dehydration of Sewage Sludge, AETEC, Korea.

18. Zhao, Q. and Kugel, G, 1996 : Thermophilic/Mesophilic Digestion of Sewage Sludge and Organic waste, J. of Environment Science Health, 31(9), pp. 2211-2231.

19. Joon Pyo Lee, Soon Chul Park, Seung Whee Rlee, 1997 : The effect of Ammonia and Sodium Chloride on the Anaerobic Degradation of Food waste, Korean Society of Environmental Engineers, 19(9), pp. 1185-1192.

20. Jong Woong Park, Jin Bok Kim, Won Sik Ra, 2002 : Effects of Pretreatment Method and Mixing Ratio of Food Waste and Sewage Sludge on Treatment Efficiency in Anaerobic Digestion, Korea Society of Waste Management, 19(7), pp. 874-882.



이 병 선

- 건국대학교 환경공학 박사
- 현재 (주)포스벨 기업부설 연구소 연구소장

### 학회지 광고게재 안내

격월로 연간 6회 발간되는 한국자원리사이클링 학회지에 광고를 게재하고 있습니다. 알찬 내용의 학회지가 될 수 있도록 특별회원사 및 관련기업에서는 많은 관심을 가지고 협조하여 주시기 바랍니다. 광고게재 비용은 아래와 같으며, 기타 자세한 내용 및 광고게재에 관해서는 학회로 문의하시기 바랍니다.

	칼라인쇄 (1회)	흑백인쇄 (1회)	1년 6회 게재 기준			
			칼라 인쇄		흑백 인쇄	
			일 반	특별회원사	일 반	특별회원사
앞표지 안 쪽	50 만원	30 만원	180 만원	140 만원	130 만원	100 만원
뒷표지 안 쪽	50 만원	30 만원	180 만원	140 만원	130 만원	100 만원
뒷표지 바깥쪽	60 만원	40 만원	200 만원	150 만원	150 만원	120 만원
학회지 안(내지)	30 만원	20 만원	100 만원	80 만원	80 만원	50 만원

※Film을 주시는것을 기준으로 책정된 금액입니다.