Journal of Environmental Science International
30(6); 429~439; June 2021

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2021.30.6.429

ORIGINAL ARTICLE

동력학-전달 모델을 활용한 식품 폐기물 감량 해석

조선주 · 김태욱 · 권성현[1)] · 조대철[*]

순천향대학교 에너지환경공학과, [1)]경상대학교 해양환경공학과

Simulative Calculations of Food Waste Reduction Using Kineto-transport Models

Sun-joo Cho, Tae-wook Kim, Sung-hyun Kwon[1)], Daechul Cho[*]

Department of Environmental Engineering, Soonchunhyang University, Asan 31538, Korea

[1)]Department of Marine Environmental Engineering, Engineering Research Institute (ERI), Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

Abstract

Food waste is both an industrial and residential source of pollution, and there has been a great need for food waste reduction. As a preliminary step in this study, waste reduction is quantitatively modeled. This study presents two models based on kinetics: a simple kinetic model and a mass transport-shrinking model. In the simple kinetic model, the smaller is the reaction rate constant ratio k_1, the lower the rate of conversion from the raw material to intermediate products. Accordingly, the total elapsed reaction time becomes shorter. In the mass transport-shrinking model, the smaller is the microbial decomposition resistance versus the liquid mass transfer resistance, the greater is the reduction rate of the radius of spherical waste particles. Results showed that the computed reduction of waste mass in the second model agreed reasonably with that obtained from a few experimantal trials of biodegradation, in which the microbial effect appeared to dominate. All calculations were performed using MATLAB 2020 on PC.

Key words : Food waste reduction, Kineto-transport model, Biodegradation, MATLAB, Particle shrinking

1. 서 론

국내의 음식물류 폐기물 배출량은 368 g/일·인, 연 평균 약 570만 톤/연이 배출된다. 이 가운데 70% 정도가 가정과 소형 음식점에서 배출되며, 인구 증가와 생활 수준의 향상으로 매년 3%씩 발생량이 증가하는 추세이다 (Korea Environment Corporation, 2018).

이에 식품 폐기물의 적절한 처리 방법으로 활발한 연구가 이루어지고 있다. 근래에는 Mechanical Biological Treatment (MBT) 개념을 활용하여 유기성 폐기물을 바이오 가스로 전환하는 연구가 수행되었다. 이는 도시고형폐기물(organic fraction of municipal solid waste)의 바이오 가스화 연구를 수행하며 유기성 폐기물뿐만 아니라 생분해성 물질에 대한 바이오 가스화의 가능성을

Received 8 March, 2021; **Revised** 21 May, 2021;
Accepted 24 May, 2021
[*]**Corresponding author**: Daechul Cho, Department of Environmental Engineering, Soonchunhyang University, Asan 31538, Korea.
Phone : +82-41-530-1341
E-mail : daechul@sch.ac.kr

ⓒ The Korean Environmental Sciences Society. 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.

평가하였다(Lee, 2008).

또한, BMP (Biochemical Methane Potential) 측정법을 활용하여 생분해도에 미치는 영향과 가정에서 발생하는 식품 폐기물의 종류별 생분해도 특성을 평가하는 등의 연구도 이루어졌다. 유기성 도시폐기물의 혐기성 분해특성과 관련된 분해기작, BMP 등에 관한 연구는 소화기술들의 효율 개선 및 새로운 소화조의 설계에 중요한 정보를 제공하는 것으로 보고되었다(Park et al., 2001). BMP 측정법으로 구해진 반응속도상수 k_i값은 채소류, 곡물류 등의 대상 기질에 대한 생분해도와 분해 속도를 평가하기 위해 사용할 수 있는 중요한 인자로 다양한 연구에 활용될 수 있다.

고형물의 함량이 높은 유기성 쓰레기의 혐기성 분해 반응에 있어서 1차 반응 모델은 단순하고 설계에도 응용이 용이하기 때문에 가장 일반적으로 사용되고 있는 동력학적 해석법이다. Shin et al.(1995a)이 유기성 폐기물의 혐기성 분해기작을 1차 반응으로 나타냄으로써 혐기성 분해 특성을 속도론적으로 해석하였을 때 단위 기질들의 혐기성 분해 속도는 문헌에 보고된 결과들 보다 큰 값으로 나타났다. 그러나 메탄전환율은 대체로 기존의 BMP 실험에 의해서 보고된 결과들보다 작은 값을 보이는 것으로 평가되었다. 이것을 실험 조건에 따라 최대 기질 분해 속도상수 값이 다르게 변화할 수 있음을 의미한다.

식품 폐기물의 효율적인 감량으로 유기물의 조성보다 입자의 혐기성 분해와 크기가 관련이 크다는 사실을 알 수 있다. 혐기성 분해에 대한 입자 크기의 영향을 연구한 실험에서는 식품 폐기물을 종류별로 분류하여 입자의 크기를 대, 중, 소 3단계로 구분하였다. 각 입자의 크기 범위는 곡물류 2~9 mm, 채소류 2~25 mm, 육류 2~25 mm로 나타났으며, 입자의 크기가 메탄전환율에는 영향을 주지 않는다는 결과가 도출되었다. 그러나 혐기성 분해 속도는 입자 크기가 감소함에 따라 증가하는 결과가 나타났는데, 입자 크기가 감소함에 따라 증가된 기질의 표면이 효소와 기질의 접촉 기회를 증가시키기 때문임을 알 수 있었다.

혐기성 분해 특성 중 율속단계 평가를 위한 모델에서는 식품 폐기물의 율속단계 결정변수와 반응 속도 상수 비를 해석해야 한다. 여기에서 산생성 반응과 메탄생성 반응에 대한 반응 속도 상수 비는 k_1/k_2로 나타낼 수 있고, 율속단계 결정변수는 반응 속도 상수 비의 대수값으로 계산한다. Shin et al.(1995b)에 의하면 식품 폐기물의 율속단계 결정변수 값은 농촌 지역에서 -0.665였으나, 식당에서는 0.365로서 발생원에 따라 큰 차이를 보였으며, 식품 폐기물의 반응 속도 상수 비 k_1/k_2에 대해서는 농촌 지역에서 0.514, 식당에서 1.462로 나타났다. 이는 생분해 특성이 다양한 곡물류, 채소류 등으로 구성된 식품 폐기물의 조성 차이 때문인 것으로 사료되었다. 여러 가지 유기성 폐기물들에 대한 혐기성 분해 특성 평가로부터 혐기성 공법에 의해 효율적으로 처리하기 위해서는 가수분해 및 산생성 반응을 촉진시킬 수 있는 율속단계를 극복하는 것이 필요하다.

우리나라 주방 폐기물의 혐기성 소화 공정을 모델링하면 주방폐기물은 균질이고 1차 반응으로 가수분해 된다고 생각할 수 있다. 모든 반응은 액상에서 일어나고 발생된 기체의 일부는 액상에 용해로, 나머지는 기상으로 배출된다고 가정하였을 때 혐기성 소화가 진행되는 과정의 중간 산물로 propionate, butyrate, acetate 등 8가지의 물질이 고려되었다. 실제 실험 결과 최종 가스 발생량은 모델과 전체적인 경향은 일치하지만 CH_4가 예측된 값보다 적고, CO_2는 예측된 값보다 높은 결과가 나타났다. 이는 실제 주방폐기물은 균질이 아니고 곡류와 채소류 등은 가수분해 속도에 차이가 있기 때문이라 생각할 수 있다(Choi et al., 1998).

반응 속도 상수와 유기 성분 조성(탄수화물, 단백질, 지질)의 작용을 확인하기 위해 유기성분이 식품 폐기물의 혐기성 생분해에 미치는 영향을 평가하였다. 2차 다항식 모델을 개발하여 식품 폐기물 분해의 주요 공정 매개변수를 식별하였을 때, 유기성분의 조성이 모델의 소화 매개 변수 추정에는 사용되었으나 가수분해 속도 상수와는 상관관계가 없음이 나타났다(Li et al., 2017).

Choi et al.(1998)은 식품 폐기물 처리의 문제점을 극복하기 위해서는 모델링을 활용한 공정의 적절한 설계와 제어가 필수적이라고 보고하였다. 모델링의 장점은 시스템 특성을 수학적으로 표현하는 과정으로, 다양하고 복잡한 데이터를 정량화·수식화 할 수 있다는 것이다(Glossary of Information and Communication Technology, 2020).

이러한 기존 연구를 바탕으로 본 연구는 식품 폐기물 처리를 현상학적으로 설명하고 동력학 및 전달현상에

기반한 수리모델을 개발하고자 하였다. 아직 폐기물 분야에서 연구 결과가 일천한 생분해 모델링의 선구적 모델을 제시하고자 한다. 한편, 모델의 계산을 위해 사용자 편의성을 감안하여 MATLAB 프로그래밍 기법을 사용하였다.

2. 이론 및 방법

2.1. 단순 반응 모델(simple kinetic model)

단순 반응 모델은 음식 폐기물이 시간의 흐름에 따라 생분해되는 과정을 동력학적으로 나타낸 모델로서, 입자가 분해되면서 중간 산물과 기체나 액체 형태의 최종 산물로 전환된다고 가정한다. 동력학적 생분해 반응은 다음과 같이 표현될 수 있다(Fig. 1). 따라서 Fig. 1의 생분해 경로를 고려한 생화학 반응식을 식 (1-1)과 식 (1-2)로 나타낼 수 있다. 두 가지 식으로 나눌 수 있다.

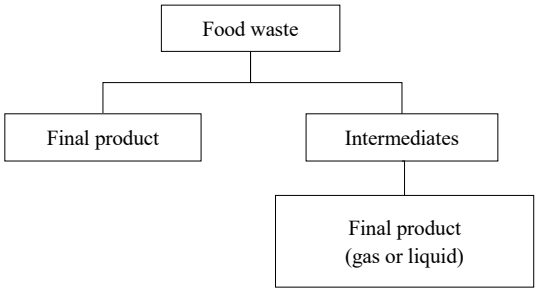

Fig. 1. Biodegradation steps over time for food waste in the simple kinetic model.

$$A \xrightarrow{k_1} B \xrightarrow{k_2} C \tag{1-1}$$

$$A \xrightarrow{k_3} C \tag{1-2}$$

즉, 식 (1-1)은 A(식품 폐기물)가 혐기성 조건으로 소화되어 중간물질인 B로 변환되고 다시 B가 기체나 액체 상태의 최종산물 C로 변환되는 반응을 보여주고 있다. 또한 극단적으로 단순화한 반응으로서 A가 직접적으로 (예를 들어 통기/호기성 반응) C로 변화하는 반응을 식 (1-2)와 같이 제시하였다. 화학반응식 (1-1)과 (1-2)를 각 성분 A, B, C에 대하여 가장 단순한 형태인 1차 반응으로 표현하면 식 (1-3) ~ (1-5)로 정리할 수 있다.

$$\frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_A - k_3 C_A \tag{1-3}$$

$$\frac{dC_B}{dt} = k_1 C_A - k_2 C_B \tag{1-4}$$

$$\frac{dC_C}{dt} = k_2 C_B - k_3 C_A \tag{1-5}$$

식품 폐기물의 초기 값 A_0는 현재 각 성분의 합과 같으므로 식 (1-6)이 성립한다.

$$C_{A0} = C_A + C_B + C_C \tag{1-6}$$

이를 해석적으로 풀면 식 (1-7) ~ (1-9)와 같이 각 성분 농도가 시간의 함수로 표현된다.

$$C_A = C_{A0} e^{(-(k_1+k_3)t)} \tag{1-7}$$

$$C_B = \frac{k_1 C_{A0}}{k_2 - (k_1 + k_3)} \left[e^{(-(k_1+k_3)t)} - e^{(-k_2 t)} \right] \tag{1-8}$$

$$C_C = C_{A0} - C_B - C_A \tag{1-9}$$

2.2. 입자 감소 모델(mass transport-shrinking model)

음식 폐기물의 공학적 생분해는 입자화로부터 출발한다. 이에 따라 초기 입자는 균일하다고 가정하고 생분해 진행에 따라 그 입경이 감소한다고 볼 수 있다. 또한, 효소적 생화학 반응에 의한 입자 표면의 분해 작용과 액상 및 기상의 전달저항에 의해 그 속도가 결정된다. 입자 감소 모델은 다음 Fig. 2와 같이 표현될 수 있다. 초기 입자 반지름 R에서 최종 입자 반지름인 r_c까지 감소하는 반응을 정리한 식은 (2-1)과 같다. 표면 생화학 반응 k_M과 액상 물질 전달 저항 k_L^{-1}을 고려하였다.

$$-\frac{1}{S_{ext}} \frac{dN_A}{dt} = \frac{(bN_M)}{\frac{1}{k_L} + \frac{R^2}{r_c^2} \frac{1}{k_M}} = \frac{bN_M}{\frac{1}{k_T}} \tag{2-1}$$

여기서, b는 유기물 농도, N_m는 총 미생물 개체수(population), k_m은 미생물 반응 계수, k_L은 액체 확산 계수, ρ_A는 밀도, $1/k_T$은 총 전달 저항을 나타낸다. 한편,

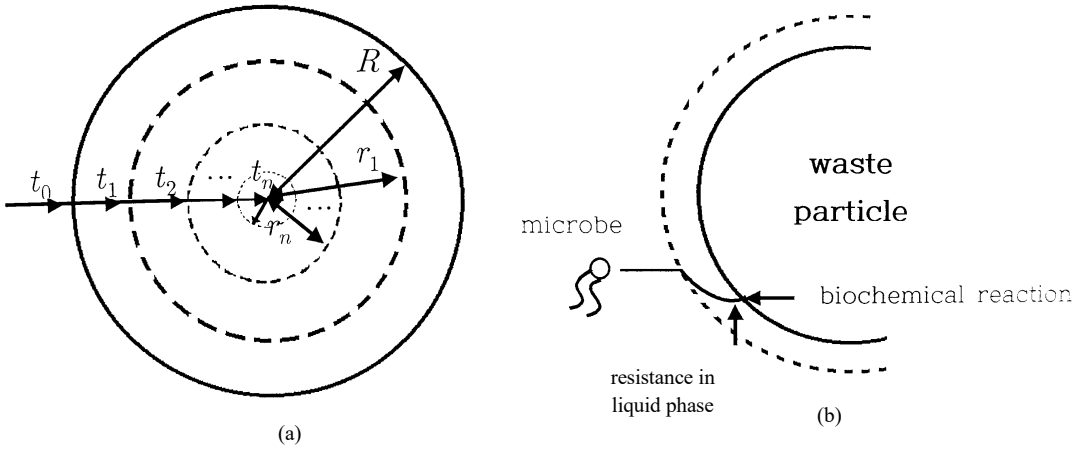

Fig. 2. Particle size deceasing over time (a) and kineto-transport resistances (b) in the mass transport-shrinking model.

S_{ext}는 구의 표면적을, N_A는 폐기물 입자의 질량을 나타낸 것으로 식 (2-2)와 식 (2-3)와 같이 해석할 수 있다.

$$S_{ext} = 4\pi r_c^2 \tag{2-2}$$

$$dN_A = \rho_A dV = \rho_A d(\frac{4}{3}\pi r_c^2) = \frac{4}{3}\pi \rho_A r_c^2 dr_c \tag{2-3}$$

식품 폐기물은 주로 함수율이 80% 정도를 차지하며 미생물에 의해 분해가 가능하다. 그러므로 분해에서 공기 저항의 영향이 극히 작다고 가정하여 액상 물질 전달 저항과 미생물 분해저항만을 고려한다. 식 (2-1)에서 액체 확산 계수와 미생물 반응 계수를 역수로 취해줌으로써 각각 액상 물질 전달저항과 미생물 분해저항으로 나타낼 수 있으며 이들은 물질전달 총 저항으로 표현할 수 있다. 식 (2-2)와 (2-3)을 식 (2-1)에 적용시켜 풀이하면 최종 입자 감소 모델을 식 (2-4)로 나타낼 수 있다.

$$-\frac{dr_c}{dt} = \frac{(bN_m/\rho_A)}{\frac{1}{k_L} + \frac{R^2}{r_c^2 k_M}} \tag{2-4}$$

2.3. 모델 해석

단순 반응 모델과 입자 감소 모델의 계산은 MATLAB을 사용하여 프로그램화 하였다. 단순 반응 모델의 경우 이론적 해와 수치적 계산이 가능하였고, 수치적 해는 미분 방정식 solver인 'ODE 45'를 활용하여 계산하였다. 입자 감소모델 해석에 Shin et al.(1995b)의 입자 mm 단위 입경을 인용하였으며, 각 모델에서 얻어진 데이터는 MATLAB 외에 Excel에서 필요한 대로 그래프를 모사하였다.

2.4. 실험 방법

생분해 실험을 위해 블랜더를 사용하여 식품 폐기물을 분쇄하였다. 식품 폐기물 중 셀룰로오스가 주 성분인 채소류 배추를 활용하였다. 순천향대학교 캠퍼스 야산에서 목재 버섯균류를 채취하였으며, 채취한 목재 버섯균류는 각각 30℃와 30 rpm으로 조정한 진탕배양기 VS-8480SF모델에 액체 배양하였다. 배양액은 BG11 Broth 1.6 g을 증류수 1 L에 융해시켜 제조하였으며, 120℃까지 고온멸균하고 상온에서 30℃가 되도록 식힌 후 목재 버섯균류를 접종하였다. 준혐기성 조건으로 상온에 비치하여 30분마다 식품 폐기물의 무게를 측정하였으며, 21일간 생분해를 진행하였다. 현미경으로 1,000배 확대하여 관찰하였을 때 모양이 유사한 버섯균류(Fig. 3)를 각각 일정한 양으로 혼합하여 10 ml로 제조하였다. 식품 폐기물과 배양한 목재 버섯균류를 T flask에 9:1 비율로 혼합하고 초기 내용물의 무게를 100 g으로 맞추었다. 21일이 지난 후 폐기물의 무게는 100 g에서 87 g으로 감소하여 13%가 감소하였다.

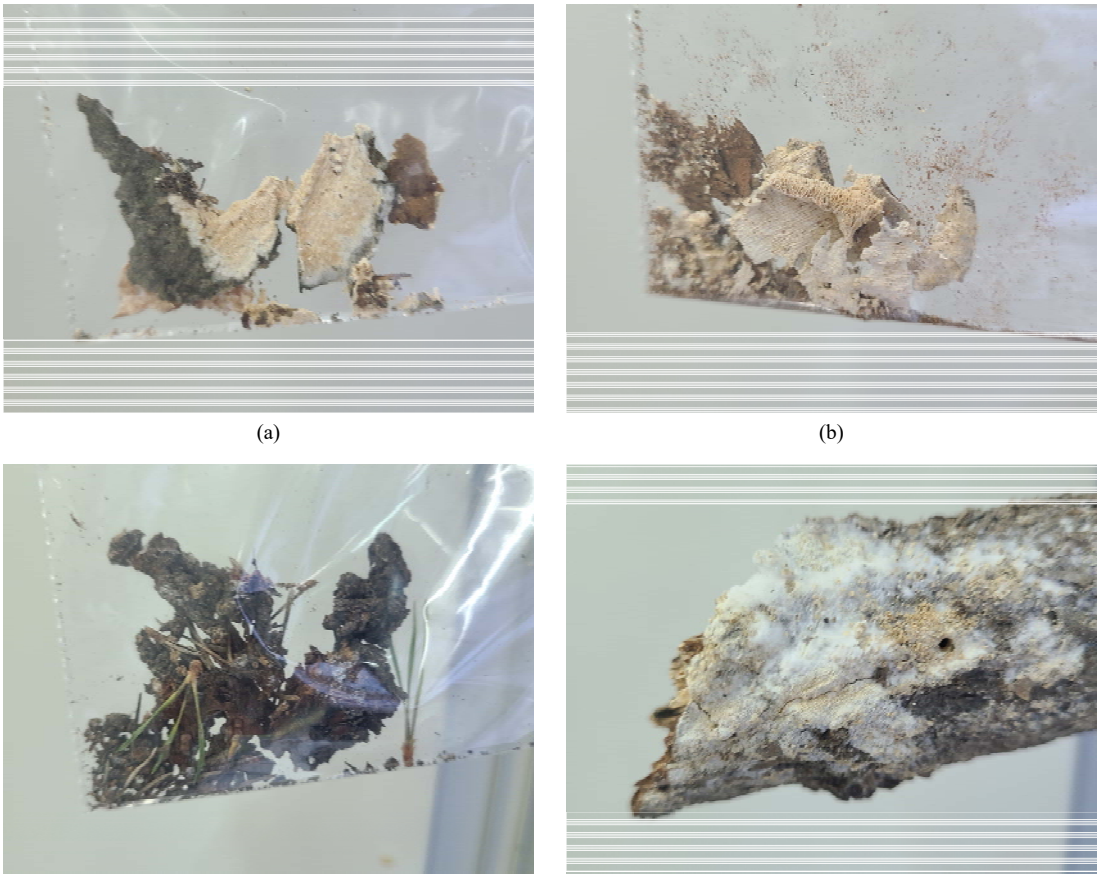

Fig. 3. Wood mushroom fungus collected at different locations. (a)~(d) denote the location-specific fungi.

3. 결과 및 토의

3.1. 단순 반응 모델(simple kinetic model)의 해석

앞서 식품 폐기물을 종류별로 분류하여 반응 속도 상수 값 k_i에 대해 제시한 바 있다. 이후 혐기성 분해 특성 중 식품 폐기물의 반응 속도 상수 비를 해석하였고, 여기에서 산생성 반응과 메탄생성 반응에 대한 반응 속도 상수 비를 k_1/k_2로 나타내었다. Park et al.(2001)이 제시한 반응 속도 상수 k_i는 0.0495 ~ 0.2022 d^{-1}범위의 값을 보여 Shin et al.(1995a)이 보고한 0.1015 ~ 0.2923 d^{-1}보다는 낮은 결과가 나타났으나, Owens and Chynoweth(1993)이 유기성 도시폐기물에 대한 실험에서 구한 k값을 0.072 ~ 0.075 d^{-1}로 보고한 값에 비하여 높은 값을 보였다. 그러므로 단순 반응 모델에서는 중간 범위의 반응 속도 상수 값 0.072 ~ 0.137 d^{-1}을 차용하였고, k_1은 Park et al.(2001)의 논문에서 제시한 값을 표준으로 사용하였다.

여기서, k_i값의 종류는 어류, 과일류, 곡물류, 채소류 4가지로 분류하였으며 각 분류의 평균값은 어류 0.072 d^{-1}, 과일류 0.0987 d^{-1}, 곡물류 0.1216d^{-1}, 채소류 0.137 d^{-1}으로 계산되었다. 이는 식품 폐기물의 종류에 따라 생분해에 소요되는 시간이 각각 다르므로 나타나는 차이 때문이라 추측할 수 있다.

식품 폐기물의 반응 속도 상수 비 k_1/k_2에 대해서는 Shin et al.(1995a)이 제시한 값으로 농촌 지역에서의

0.514, 식당에서의 1.462를 사용하였으며, k_2는 이 식품 폐기물의 반응 속도 상수 k_1/k_2을 일정 비율로 계산하여 사용하였다.

반응 속도 상수 비 k_1/k_2에서 k_1의 비율을 1로 하였을 때 식당에서의 k_2는 0.684로, 농촌지역에서의 k_2는 1.946으로 계산됨을 알 수 있다. 그러므로 식당에서의 반응 속도 상수 비는 $k_1:k_2$=1:0.684로, 농촌 지역에서의 반응 속도 상수 비는 $k_1:k_2$=1:1.946으로 나타낼 수 있다. 여기서, $k_1:k_2$=1:0.684와 $k_1:k_2$=1:1.946 값 사이에 기준을 잡을 중간 값으로 $k_1:k_2$=1:1 비율을 제시해주었다.

k_3는 식품 폐기물이 중간 산물을 거치지 않고 직접적으로 최종 산물로 전환되는 반응 속도 상수로서 k_1과 k_2에 비해 극히 작다고 가정하였고, k_1이 1일 때 0.1의 비율로 나타내었다. 1차 반응으로 제시한 각 폐기물의 평균값을 활용하여 계산한 결과를 Fig. 4 ~ 6에 표시하였으며, 단순 반응 모델에서 제시한 식품 폐기물을 분류하여 반응 시간에 따른 농도 변화의 값을 Table 1에 나타내었다.

$k_1:k_2$=1:0.684일 때의 반응에서 분해 속도가 최대인 시간은 어류 16.7일, 과일류 12.2일, 곡물류, 9.9일, 채소류 9일이었고, $k_1:k_2$=1:1일 때의 분해 속도 최대 시간은 어류 13.7일, 과일류 9.9일, 곡물류 8.7일, 채소류 7.3일이었다. $k_1:k_2$=1:0.684와 비교하였을 때 $k_1:k_2$=1:1에서 어류 17.96%, 과일류 18.85%, 곡물류 17.17%, 채소류 18.89%만큼 감소하여 평균 18.22%의 분해 시간 감소율이 나타났다. $k_1:k_2$=1:1.946는 어류 9.9일, 과일류 7.4일, 곡물류 6일, 채소류 5.3일로 $k_1:k_2$=1:0.684에서 보다 어류 40.72%, 과일류 39.34%, 곡물류 39.39%, 채소류 41.11%만큼 감소하여 평균 40.14%의 분해 시간 감소율을 보였다.

특히, 분해 속도가 최대일 때 $k_1:k_2$=1:0.684에서 중간 산물의 평균 농도는 43.7 kg/m^{3}이고 $k_1:k_2$=1:1에서 중간 산물의 평균 농도가 36.605 kg/m^{3}임을 비교하였을 때 $k_1:k_2$=1:1에서 초기 농도가 중간 산물로 전환되는 비율이 16.24% 감소하였다. $k_1:k_2$=1:1.946에서는 중간 산물의 평균 농도가 25.31 kg/m^{3}이므로 $k_1:k_2$=1:0.684와 비교하였을 때 중간 산물로 전환되는 비율이 42.08%로 중간 값보다 약 2배만큼 더 감소함을 알 수 있다.

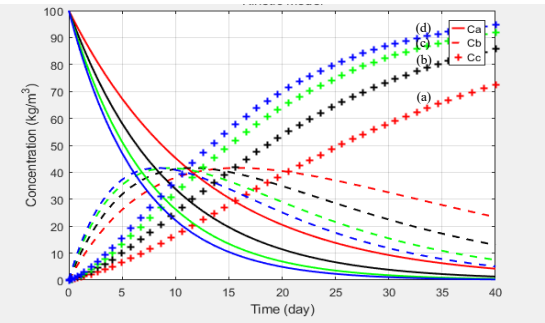

Fig. 4. Typical biological degradation of food wastes when $k_1:k_2:k_3$=1:0.684:0.1
(a) k_1=0.072d^{-1} for fish (b) k_1=0.0987d^{-1} for fruit (c) k_1=0.1216d^{-1} for crops (d) k_1=0.137d^{-1} for vegetable in the simple kinetic model.

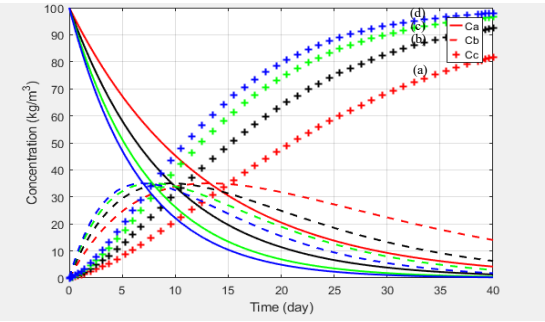

Fig. 5. Typical biological degradation of food wastes when $k_1:k_2:k_3$=1:1:0.1
(a) k_1=0.072d^{-1} for fish (b) k_1=0.0987d^{-1} for fruit (c) k_1=0.1216d^{-1} for crops (d) k_1=0.137d^{-1} for vegetable in the simple kinetic model.

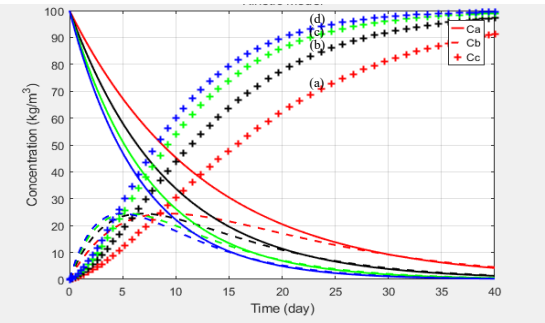

Fig. 6. Typical biological degradation of food wastes when $k_1:k_2:k_3$=1:1.946:0.1
(a) k_1=0.072d^{-1} for fish (b) k_1=0.0987d^{-1} for fruit (c) k_1=0.1216d^{-1} for crops (d) k_1=0.137d^{-1} for vegetable in the simple kinetic model.

Table 1. Kinetic parameter values (reaction rate constants) used in the simple kinetic model

	Group	Time (day)	Food waste (kg/m^3)	Intermediate products (kg/m^3)	Final product (kg/m^3)
*$k_1:k_2:k_3$ =1:0.684:0.1	Fish	0	100	0	0
		16.7	29.63	43.7	26.66
		40	5.45	26,05	68.49
	Fruits	0	100	0	0
		12.2	29.68	43.7	26.62
		40	1.86	14.92	83.23
	Crops	0	100	0	0
		9.9	29.63	43.71	26.67
		40	0.74	6.02	93.59
	Vegetables	0	100	0	0
		9	28.72	43.69	27.59
		40	0.4	6.02	93.59
$k_1:k_2:k_3$ =1:1:0.1	Fish	0	100	0	0
		13.7	37.04	36.6	26.36
		40	5.45	15.94	78.61
	Fruits	0	100	0	0
		9.9	37.44	36.6	25.97
		40	1.86	7.47	90.68
	Crops	0	100	0	0
		8.2	36.53	36.61	26.87
		40	0.74	3.67	95.6
	Vegetables	0	100	0	0
		7.3	26.33	36.61	27.07
		40	0.4	2.22	97.38
$k_1:k_2:k_3$ =1:1.946:0.1	Fish	0	100	0	0
		9.9	48.78	25.32	25.9
		40	5.45	5.43	89.11
	Fruits	0	100	0	0
		7.4	47.99	25.31	26,71
		40	1.86	1.93	96.21
	Crops	0	100	0	0
		6	47.99	25.31	26,71
		40	0.74	0.78	98.49
	Vegetables	0	100	0	0
		5.3	47.99	25.31	26,71
		40	0.4	0.42	99.19

* k_1: Rate constant when food waste is converted into intermediate products, k_2: Rate constant when the intermediate product is converted to the final product, k_3: Rate constant when food waste is converted into final product

Table 2. Mass transfer coefficients used in the mass transport-shrinking model

	Group	Time (day)	Particle radius* (mm)	Reduction (mm)
k_L:k_M=1:1**	Crops	0	2.6	0.174
		40	2.426	
	Meat	0	6.2	0.031
		40	6.169	
	Vegetables	0	7.2	0.023
		40	7.177	
k_L:k_M=1:10	Crops	0	2.6	2.51
		40	0.8827	
	Meat	0	6.2	0.321
		40	5.879	
	Vegetables	0	7.2	0.227
		40	6.973	
k_L:k_M=1:30	Crops	0	2.6	2.6
		20.5	0	
	Meat	0	6.2	0.913
		40	5.287	
	Vegetables	0	7.2	0.678
		40	6.522	
k_L:k_M=1:50	Crops	0	2.6	2.6
		12.6	0	
	Meat	0	6.2	1.513
		40	4.687	
	Vegetables	0	7.2	1.125
		40	6.075	

* Refer to Shin et al.(1995b)
** k_L: Liquid diffusion coefficient, k_M: Microbial reaction coefficient

Fig. 4 ~ 6에서 식품 폐기물이 중간 산물로 전환되는 반응 속도 상수 k_1보다 중간 산물에서 최종 산물로 전환되는 k_2가 클수록 분해 시간이 단축되었다. 또한 k_1:k_2=1:0.684와 k_1:k_2=1:1.946가 동일한 분해 시간인 40일에서 각각 93.59%와 99.19%로 반응이 완료되므로 반응 속도 상수 k_1/k_2의 비율이 작을수록 반응 시간이 단축된다는 결과가 나타났다. 이는 k_2의 값이 클수록 식품 폐기물이 중간 산물에 머무르는 시간이 감소하고 즉시 최종 산물로 전환되기 때문으로 추측할 수 있다.

3.2. 입자 감소 모델(mass transport-shrinking model)의 해석

Choi et al.(1998)은 식품 폐기물의 효율적인 감량으로 유기물의 조성 보다 입자의 혐기성 분해와 크기가 관련이 크다는 사실을 발표하였다. 그러므로 입자 감소 모델에서는 식품 폐기물 분류의 구분 별 평균입자 크기에서 입자 반지름 감소율과 무게 감소율을 계산하였으며, 미생물 저항과 액상 물질 전달 저항에 대한 영향을 평가하였다. 한편, 입자를 크기별로 분류하고 각 입자의 크기를 대, 중, 소 3단계로 구분하여 곡물류 2 ~ 9 mm, 육류

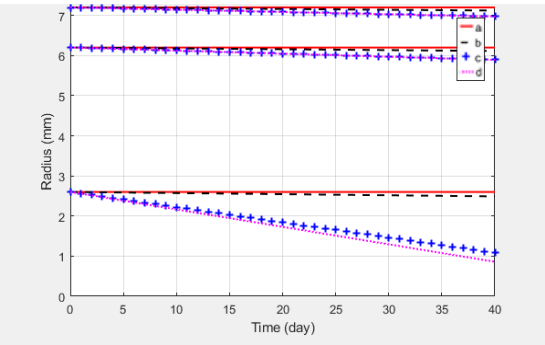

Fig. 7. Radius change of food waste particles when R=2.6mm for crops, R=6.2mm for meat, and R=7.2mm for vegetable in the mass transport - shrinking model.
(a) k_L:k_M=10^{-6}:1 (b) k_L:k_M=10^{-4}:1 (c) k_L:k_M=10^{-2}:1 (d) k_L:k_M=1:1

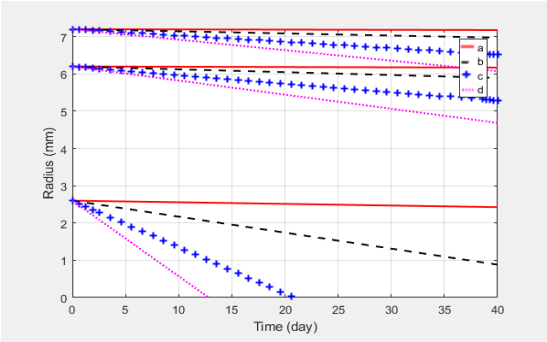

Fig. 8. Radius change of food waste particles when R=2.6mm for crops, R=6.2mm for meat, and R=7.2mm for vegetable at in the mass transport - shrinking model.
(a) k_L:k_M=1:1 (b) k_L:k_M=1:10 (c) k_L:k_M=1:30 (d) k_L:k_M=1:50

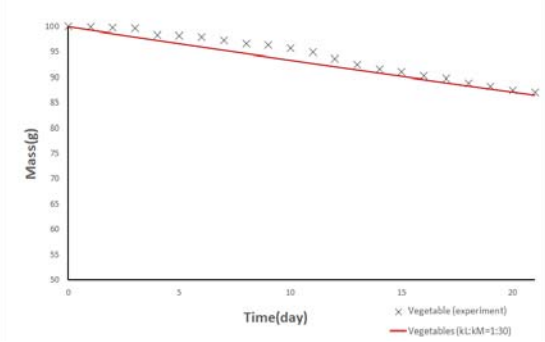

Fig. 9. An example of comparison between calculated and tested mass reduction of food waste when k_L:k_M=1:30.

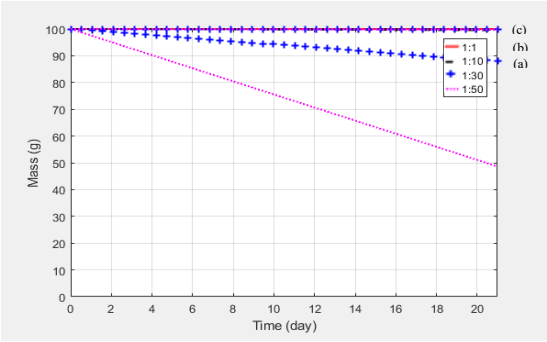

Fig. 10. Mass reduction of food waste particles when k_L:k_M=1:1, k_L:k_M=1:10, k_L:k_M=1:30, and k_L:k_M=1:50 at (a) R=2.6mm for crops (b) R=6.2mm for meat (c) R=7.2mm for vegetables in the mass transport -shrinking model.

2 ~ 25 mm, 채소류 2 ~ 25 mm의 범위를 나타낸 분해 속도 평가 연구가 진행된 바 있다.

본 연구는 각 입자의 평균 반지름을 계산하여 곡물류 2.6 mm, 육류 6.2 mm, 채소류 7.2 mm에서 k_L:k_M 비에 따른 입자 감소 비율과 무게 감소 비율을 구하였고 그 결과를 Fig. 7 ~ 10에 표시하였다. 여기서, k_L인 액체 확산 계수와 k_M인 미생물 반응 계수는 반응 속도 상수 k_i와 연관성이 있을 것으로 판단되었고 단순 반응 모델의 계산에 사용된 k_i값들의 평균을 구하여 0.1073 d^{-1}으로 설정하였다. 밀도는 80%의 함수율과 식품 폐기물 내 조성에서 채소류의 비중이 높은 것을 고려하여 1.093으로 구하였고, k_L:k_M 비율은 10^{-6}:1에서부터 10^{-4}:1, 10^{-2}:1, 1:1까지 100배씩 차이를 주어 계산한 결과를 Fig. 7에 표현하였다.

k_L:k_M=10^{-6}:1일 때와 10^{-4}:1일 때는 40일이 지난 후에도 반경의 초기 값과 미미한 차이를 보였으나, k_L:k_M=10^{-2}:1일 때와 1:1일 때는 반경의 50% 이상이 감소하는 결과가 나타났다. 그러나 k_L:k_M=1:1 이후 k_L의 비율을

증가시켜도 감소율에 차이가 발생하지 않으며 일정한 값이 도출되었다. 식 (2-4)에서 액체 확산 계수와 미생물 반응 계수를 각각 역수로 표현하였는데, 이 과정에서 미생물 반응 계수는 입자의 크기에 영향을 미치지만 액체 확산 계수는 값이 커질수록 미치는 영향이 줄어드는 것을 알 수 있다. 그러므로 입자 크기에 미치는 영향을 평가하기 위해 k_L과 k_M이 일정한 값에서 k_M의 비율을 증가시켜 k_L:k_M을 1:1, 1:10, 1:30, 1:50의 비율로 계산하였다.

Shin et al.(1995a)은 입자의 크기가 감소함으로 인해 증가된 기질의 표면이 효소와의 접촉 기회를 증가시키기 때문에 혐기성 분해 속도가 증가한다고 보고하였다. k_L:k_M=1:1일 때 40일 후 입자의 반지름은 곡물류 0.174 mm, 육류 0.031 mm, 채소류 0.023 mm만큼 감소하는 것을 Fig. 8에서 확인할 수 있다. k_M의 비율이 10으로 증가하였을 때 곡물류의 반경은 2.51 mm만큼 감소하고 육류와 채소류가 각각 0.306 mm, 0.227 mm만큼씩 감소하여 입자의 반경이 가장 작은 곡물류에서 입자 감소율이 대폭 상승한 결과를 볼 수 있다. k_M의 비율이 30으로 증가하였을 때는 20.5일 후에 곡물류의 생분해 반응이 모두 완료되어 입자 반경이 0으로 감소 후 사라졌으며, 40일 후에 육류와 채소류는 0.913 mm, 0.678 mm만큼 감소하였다. 그리고 k_M의 비율이 50까지 증가하였을 때 곡물류의 생분해 반응은 12.6일에 완료되어 입자 반경이 0으로 감소하였고, 40일 후에 육류와 채소류는 1.513 mm, 1.125 mm만큼 감소하였다.

Fig. 8에서 입자의 반경이 가장 작은 곡물류가 큰 감소율을 나타내었으며 반경이 가장 큰 채소류가 적은 감소율을 나타내었다. 이로써 입자 반경이 작을수록 혐기성 분해 속도가 증가하며, k_M의 비율 증가에 따라 입자 감소율이 상승한다는 결론을 도출할 수 있었다. 즉, 입자 감소 모델에서 미생물 저항과 액상 물질 전달 저항에 대한 영향을 평가하였을 때 액상 물질 전달 저항 보다 미생물 저항이 작을수록 입자 감소율이 증가한다는 것을 알 수 있다. 그러므로 생분해에 뛰어난 미생물을 사용하거나 입자의 크기를 줄일수록 반응이 더욱 촉진될 것이라고 결론되었다.

Park et al.(2001)은 반응 속도 상수 k_i값을 제시하였을 때 채소류가 가장 크다고 발표하여 k_i값이 클수록 무게 감소율이 크다는 사실을 알 수 있었다. 채소류를 실제로 생분해시켜 실험한 데이터로서, 시간의 흐름에 따라 무게가 감소하는 형태를 Fig. 9에 나타내었다. 실험을 진행하고 21일이 지난 후 채소류에서 초기 무게에서 12% 만큼 감소한 결과가 나타났다. MATLAB을 활용하여 k_L과 k_M의 비율을 각각 계산함으로써 k_L과 k_M의 비율이 30일 때 채소류의 무게 감소가 실험 데이터와 가장 유사함을 알 수 있었다(Fig. 10).

입자의 크기가 미치는 영향을 최소화하고 k_L, k_M의 영향이 지배하는 반응의 결과를 확인하기 위해 단순 반응 모델에서 사용된 반응 속도 상수 k_i(0.072 ~ 0.137 d^{-1})를 실험과 가장 유사했던 비율인 k_L:k_M=1:30에 적용시켰다. Fig. 11에서 각 입자의 반경을 2.6 mm로 균일하게 하여 k_L, k_M의 비율이 1:1~50일 때 입자 감소를 계산하였다. 21일이 경과한 후 k_L:k_M=1:30에서 어류 0.5 g, 과일류 1.2 g, 곡물류 2 g, 채소류 11 g만큼 감소하였다. 결론적으로, 실험 데이터인 Fig. 9와 비교하였을 때 k_L와 k_M의 비율이 1:30에서의 무게 감소 경향이 실제 생분해 반응과 가장 유사하다는 결론이 도출되었다. 가상 실험 MATLAB을 이용한 결과에서 더 나아가 미생물이 생분해에 미치는 영향을 평가하기 위해 배추를 0.1~0.5 mm의 입경으로 잘게 분쇄하여 부패균, 산화균과 혼합시켜 배추의 입경 및 무게 변화를 측정하는 실험을 진행 할 예정이다.

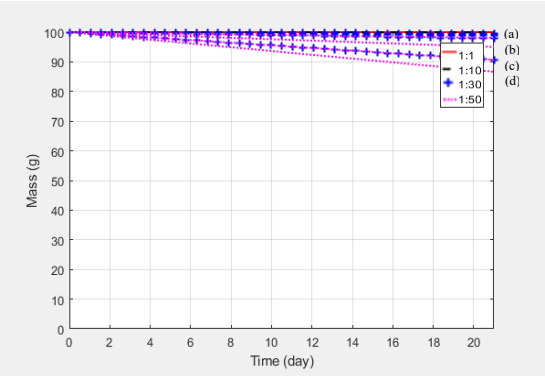

Fig. 11. Mass reduction of food waste particles when R=2.6mm (a) k_1=0.072d^{-1} for fish, (b) k_1=0.0987 d^{-1} for fruit, (c) k_1=0.1216d^{-1} for crops, (d) k_1=0.137d^{-1} for vegetable.

4. 결 론

동력학 모델을 활용하여 식품 폐기물의 감량을 정량적으로 해석하였다. 단순 반응 모델에서 반응 속도 상수 비에 따라 진행되는 반응 시간 감소율에 대한 연구를 수행하였으며, 입자 감소 모델에서 미생물 저항과 액상 물질 전달저항에 따른 분해 영향을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 단순 반응 모델에서 반응 속도 상수 비 k_1/k_2가 작을수록 최대 분해 속도가 감소하였다. k_2의 값이 클수록 식품 폐기물의 초기 농도가 중간 산물로 전환되는 비율이 감소하고 즉시 최종 산물로 전환되어 최종 반응 시간이 단축되었다.

2) 입자 감소 모델에서 입자 반경이 작을수록 혐기성 분해 속도가 증가하며, 액상 물질 전달 저항 보다 미생물 저항이 작을수록 입자 감소율이 증가한다는 것을 알 수 있다. 생분해에 뛰어난 미생물을 사용하거나 입자의 크기를 줄일수록 반응이 더욱 촉진될 것이다. 또한, k_L와 k_M의 비율이 1:30일 때 실제 생분해와 가장 유사하다는 결과가 나타났다.

REFERENCES

Choi, D. W., Lee, W. G., Jang, H. N., 1998, Anaerobic digestion of korean food waste and its mathematical modeling, Proceedings of the Korean Society of Environmental Engineers Conferences, J. Korean Soc. Environ. Eng., 437-438.

Glossary of Information and Communication Technology, 2020, http://www.ktword.co.kr/abbr_view.php?nav=&m_ temp1=587&id=736.

Korea Environment Corporation, 2018, https://www.keco.or.kr/ kr/news/communityid/11/view.do?idx=25953.

Lee, B. S., 2008, Bio-Gasification of food waste and primary sewage sludge using MBT concept, Ph. D. Dissertation, Konkuk University, Seoul, Korea.

Li, Y., Jin, Y., Borrion, A., Li, H., Li, J., 2017, Effects of organic composition on the anaerobic biodegradability of food waste, Bioresource Technology, 243, 836-845.

Owens, J. M., Chynoweth, D. P., 1993, Biochemical methane potential of Municipal Solid Waste (MSW) components, Wat. Sci. Technd., 27, 1-4.

Park, N. B., Gill, D. S., Lee, H. M., 2001, The characteristics of anaerobic biodegradability by food waste, Korean J. Sanitation., 16, 24-31.

Shin, H. S., Song, Y. C., Bae, B. U., 1995a, Anaerobic degradation characteristics of organic waste component (Ⅰ) : methane conversion, kinetics, particle size effect, . Korean Soc. Environ. Eng., 17, 237-245.

Shin, H. S., Song, Y. C., Bae, B. U., 1995b, Anaerobic degradation characteristics of organic waste (Ⅱ) : a model for evaluation of rate limiting step, J. Korean Soc. Environ. Eng., 17, 533-542.

• Graduate student. Sun-Joo Cho
Department of Environmental Engineering, Soonchunhyang University
tjswn978@naver.com
• Graduate student. Tae-Wook Kim
Department of Environmental Engineering, Soonchunhyang University
taewook1213@naver.com
• Professor. Sung-Hyun Kwon
Department of Marine Environmental Engineering, Gyeongsang National University
shkwon@gnu.ac.kr
• Professor. Dae-Chul Cho
Department of Environmental Engineering, Soonchunhyang University
daechul@sch.ac.kr