

플라스틱 용기 포장 두부의 유통기간 예측을 위한 3차원 수치모사

김재능* · 이윤석
연세대학교 패키징학과

Three Dimensional Mathematical Simulation for Predicting the Shelf Life of Tofu Packaged in a Semi-rigid Plastic Container

Jai Neung Kim* and Youn Suk Lee
Department of Packaging, Yonsei University

Abstract In this research, three dimensional mathematical models were developed to predict the shelf life of tofu packaged in a semi-rigid plastic container. A model combining oxygen transfer through the package and oxygen consumption within the package was considered. According to the results, the model simulations estimated that the number of microorganisms in the filled water was higher than that in the tofu, suggesting the shelf life of packaged tofu was not affected by the number of microorganisms in the tofu product, but rather by the number of organisms in the filled water. Additionally, the effects of the physical properties of the packaging material, such as oxygen permeability through the package, oxygen diffusion coefficient, the initial oxygen concentration in the filled water, and the depth of the filled water in the packaged tofu, were also observed.

Key words: shelf-life, semi-solid packages, packaged tofu, simulation

서 론

식품의 보관수명은 식품이나 의약품이 상품가치를 가지는 기간으로, 식품의약품 관련 법규상 식품의 포장표면에 제품의 보관수명을 명기하도록 법으로 정해져 있다. 또한 산업체의 이익과 직결되는 문제이므로 식품업체에서는 이 보관수명을 늘리려고 새로운 기술 연구들이 활발히 이루어지고 있다(1). 특히 식품에 있어서 보관수명에 가장 많은 영향을 미치는 요소 중 하나가 포장이므로 식품업체에서는 포장설계에 많은 관심을 가지고 있다. 그러나 국내에는 아직 이 분야에 대한 연구가 거의 미흡한 실정이고 따라서 포장설계에 많은 애로점이 있다. 그러나 선진국에는 식품의 보관수명에 영향을 미치는 포장방법 및 포장기술에 많은 연구가 화학공학 물질전달 분야에서 서서히 이루어지고 있다. 따라서 국내에서도 이에 관한 연구가 필요한 시점이라 판단된다.

일반적으로 포장재를 통과한 수분 및 산소의 이동이 식품의 보관수명에 절대적인 영향을 미친다. 공기중의 수분이나 산소가 포장재를 통과하고 포장재 내와 포장된 식품 안으로 이동하면서 제품의 성분들과 화학적 미생물학적 변화를 일으켜 식품의 품질을 저하시켜서 보관수명을 단축시킨다. 대체적으로 수분은 약품이나 식품에서 수분활성도를 높여 화학변화 및 미생물의 성장에 지대한 영향을 미치며, 산소는 식품에 색, 영양소 및 향에 미치는 영향이 크다(2). 식품의 보관수명을 실험적으로 구하는 것 과 이를

근거로 포장 설계하는데 많은 시간과 비용이 투자되어 제품을 바로 시장에 내놓아야 하는 기업의 입장에서 이는 현실적이지도 않다. 따라서 식품의 변함 없는 고른 고품질을 강조하는 현 추세에 비추어, 포장된 식품의 유통 중 품질특성 변화를 예측할 수 있는 수학적 모델이 필요하게 되었다. 실험을 최소한으로 줄이면서 식품이나 의약품의 보관수명을 예측하고 포장을 설계할 수 있다면 이는 산업체에 커다란 도움이 되리라 사료된다. 이와 같은 이유로 식품 및 의약품의 보관수명을 예측하기 위해 많은 수학적 모델이 개발되어 왔다(3,4).

대부분의 수학적 모델이 공기중의 수분이나 산소가 포장재를 통과하고 포장재 내와 포장된 식품이나 의약품 안으로 이동하는 현상을 정상상태로 가정하였고, 제품 내에서의 화학반응을 고려치 않았으며, 일차원 모델이었다. 그러나 실제현상은 공기중의 수분이나 산소가 포장재를 통과하고 포장재 내와 포장된 식품이나 의약품 안으로 이동하는 현상은 비정상상태이고 통과된 수분이나 산소는 제품 내에서 화학반응을 일으켜 실제 이동되는 수분이나 산소의 양이 줄어들면서 제품 내로 이동하고 대부분이 x-, y-, z- 방향의 삼차원으로 이동하고 있다.

두류는 모든 작물 가운데 가장 효과적인 단백질 원으로 전 세계적으로 중요한 단백질 자원이 되고 있다. 우리나라도 많은 양의 두류가 소비되고 있는데 우리의 식습관상 장류와 더불어 두부 등 제품으로 많이 이용되고 있다. 두부는 수분함량이 높고 고단백식품이나(5), 영양이 풍부해 쉽게 변질되므로 냉장고에 보관하더라도 오래 보관하기 어려울 뿐만 아니라, 유통과정 중에서도 취급에 세심한 주의가 필요하다는 등의 결점이 있었다. 현재 유통되는 두부제품을 살펴보면 플라스틱 포장용기에 담겨져 외부에 노출되어진 채 유통되는 판두부와 뜨거운 쇠판에 담겨져 외부에 노출되어진 채 유통되는 온두부, 그리고 날개로 플라스틱 포장에 충전수와 함께 포장되어 냉장 유통되는 포장두부 등이 있

*Corresponding author: Jai-Neung Kim, Department of Packaging, Yonsei University, Wonju, Gangwon 220-710, Korea
Tel: 82-33-760-2379
Fax: 82-33-760-2761
E-mail: kimjn@yonsei.ac.kr
Received January 8, 2009; revised February 28, 2009;
accepted March 5, 2009

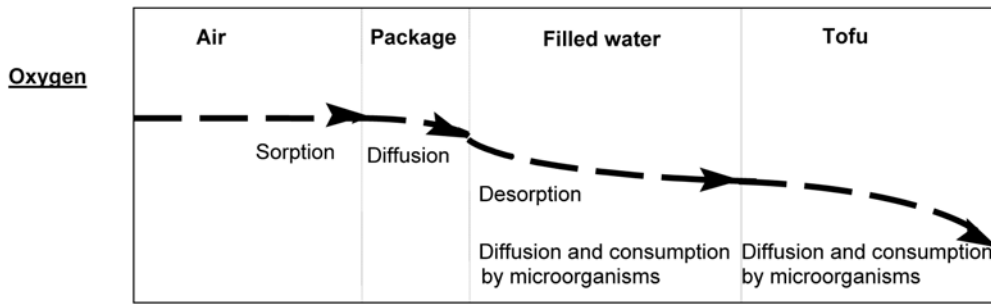


Fig. 1. Oxygen diffusion mechanism in packaged tofu system.

는데, 이들의 유통기한은 판두부와 온두부가 1일이며 새로운 형태인 포장두부의 경우도 10°C 냉장조건에서 3일로 제한되어 있고(6), 실제로도 유통 4일 경과시 두부 내의 미생물이 10⁴-10⁶개에 이르러 건강에 치명적으로 되므로 식품의 안전성 측면에서 제품의 보관 수명을 좀더 연장할 수 있는 제품과 새로운 포장방법 및 설계의 개발이 요구되는 상황이다. 주로 품질 변화에 영향을 주는 두부의 부패 원인균은 주로 *Acinetobacter calcoaceticus* var. *anitrat*과 *Klebsiella pneumoniae*의 subgroup인 *pneumoniae*가 주종을 이루며, 실제 두부포장에서 외부공기와 접촉되지 않고, 곰팡이 등의 오염이 문제가 되기 이전에 일반세균의 증식이 문제가 되므로 효모와 곰팡이는 큰 의미를 가지지 않는다. 따라서 *Acinetobacter calcoaceticus* var. *anitrat*과 *Klebsiella pneumoniae*속에 포함된 균이 두부의 보관수명을 결정할 것으로 보인다(7). 두부의 주요 부패 미생물 중 산소에 영향을 받는 호기성 박테리아인 *Acinetobacter calcoaceticus* var. *anitrat*을 본 연구의 주요 대상으로 삼았다. 저장기간 중 이 미생물의 안정성은 그 기준을 KS기준인 일반세균 10⁵ CFU/g 이하로 하였다. 플라스틱으로 포장된 두부의 품질은 보통 충전수의 산도(pH)나 미생물 수로 보관수명이 결정된다.

본 연구에서는 일반 직육면체 형태의 두부를 선정하여 공기중의 산소가 포장재를 통과하고 포장재 내의 충전수 안으로 이동하면서 충전수 내의 호기성 미생물에 의해서 산소가 소모되면서 미생물이 성장하여 그 수가 증가하는 현상을 삼차원으로 해석한 수학모델을 발전시켜 산업체에서 식품의 보관수명을 예측하고 포장 설계를 할 수 있는 수학 모델 프로그램을 개발시키는데 목적이 있다.

수학 모델 및 컴퓨터 프로그램 개발

포장 충전된 두부제품을 Fig. 1에서 산소가 포장 외부로부터 포장재를 지나 제품에 이르는 산소의 확산 메커니즘을 묘사하였다. 수치모사를 위해 다음 사항을 가정하였다.

- 1) 포장의 외부 온도는 일정하다.
- 2) 포장재질의 산소투과도 및 충전수와 두부 내 산소의 확산 계수는 온도에 의해서만 영향을 받는다.
- 3) 포장된 두부 및 외포장 형태는 3차원 육면체모양의 형태를 가진다.
- 4) 충전수내 미생물의 수는 시간에 따라 변화하나 위치에 따라서는 균일하다.
- 5) 미생물수의 증가는 산소농도에 1차원으로 비례한다.
- 6) 미생물의 수는 없어진 산소의 양에 따라 1차원으로 증가한다.
- 7) 두부 안에서의 산소확산은 두부의 공극 안에 있는 수분에 의해서만 확산된다.

재료 및 방법

모델 시스템 parameter

본 실험의 모델로 사용된 시료는 풀무원 사각두부 포장 제품(10×10×5 cm, 서울, 한국) 및 두부의 크기는 8×8×4 cm로 충전수가 채워진 제품을 기준으로 적용하였다. 부패균인 호기성 박테리아 *Acinetobacter calcoaceticus*의 Kinetic reaction rate constant (K)는 Srivastava 등(8)의 모델 연구의 데이터를 사용하였다. 충전수의 산소 확산계수 및 용해도 수치는 Kim 등(9)에 의해 측정된 계수를 사용하였다.

산소 측정

Micro oxygen electrodes(3 mm tip diameter, model MI 730, Microelectrodes Inc., Londonderry, NH, USA)를 사용하여 상온 조건에서 두부 포장 제품에 용해되어 있는 초기 용존산소를 측정하였다. 각 측정값은 연결된 OM4 oxygen meter(Microelectrodes Inc., Londonderry, NH, USA)에 의하여 산소농도, atm 또는 percent 값으로 나타냈으며 측정 electrodes는 100% N₂ gas로 표준 calibration하였다.

컴퓨터 프로그램

수학적 모델 개발을 위하여 프로그램은 유한 차분 해석법(Finite difference methods)을 적용하였으며, Fortran 언어(FORTRAN Powerstation 4.0, Standard Edition, Microsoft Cor. Redmond WA, USA)로 작성하였다. 컴퓨터 프로그램을 위한 flow chart는 Fig. 3에 나타나 있다.

수학 모델 및 프로그램 개발

제품의 충전수에 대한 산소확산을 기준으로 3차원적 수학적 모델을 Fig. 2와 같이 표현하였다.

충진수에서 산소확산 및 미생물에 의한 산소소모의 수학 모델

충진수의 산소에 관한 물질전달 수학적 수치식은 다음과 같다.

Initial conditions at t=0; 모든 x_w, y_w, z_w에서 C_w=C_{wi}

$$D_w \left[\frac{\partial^2 C_w}{\partial x_w^2} + \frac{\partial^2 C_w}{\partial y_w^2} + \frac{\partial^2 C_w}{\partial z_w^2} \right] - k C_w = \frac{\partial C_w}{\partial t} \quad (1)$$

Boundary conditions at x_w=0, L_{wx}/2;

$$\frac{dm}{dt} = \frac{PA_{xw}\Delta p}{L_p} = -D_w A_{xw} \left. \frac{\partial C_w}{\partial x_w} \right|_{x_w=0} \quad (2)$$

Boundary conditions at y_w=0, L_{wy}/2;

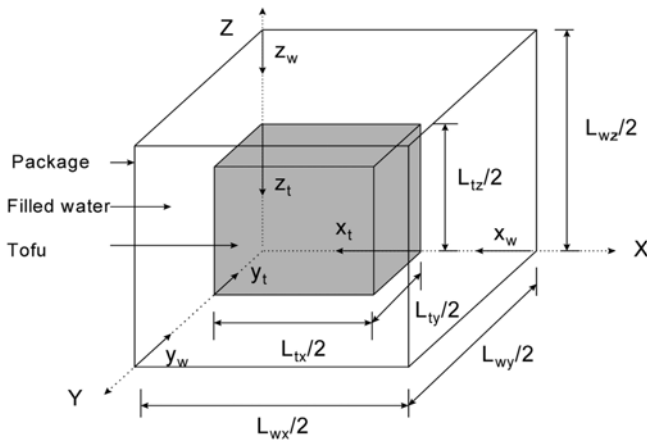


Fig. 2. The three-dimensional oxygen diffusion diagram.

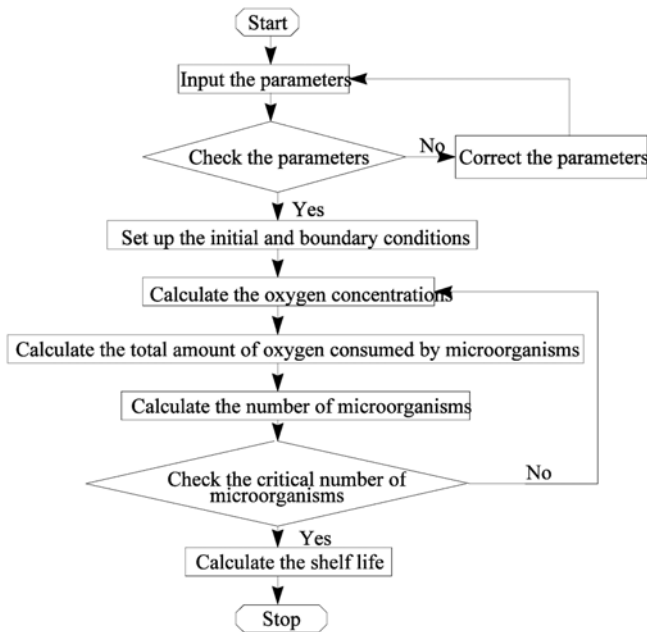


Fig. 3. Diagram of the computer programs.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{PA_{yw}\Delta p}{L_p} = -D_w A_{yw} \left. \frac{\partial C_w}{\partial y_w} \right|_{y_w=0} \quad (3)$$

Boundary conditions at $z_w=0, L_{wz}/2$;

$$\frac{dm}{dt} = \frac{PA_{zw}\Delta p}{L_p} = -D_w A_{zw} \left. \frac{\partial C_w}{\partial z_w} \right|_{z_w=0} \quad (4)$$

여기서 D_w 는 충전수내 산소확산계수(cm^2/sec)이고 C_w 는 산소농도(mg/mL), x_w, y_w, z_w 는 x, y, z 방향의 거리, k 는 미생물에 의해 산소가 소비되는 반응계수(일차반응, sec^{-1}), t 는 시간(sec)이다.

포장재와 접한 충전수에서 경계조건 식(Equations 2, 3, 4)은 포장재질로 통과한 산소가 충전수로 전달되는 것에 대한 산소의 물질수지에서 얻었다. 여기서 A_{xw}, A_{yw}, A_{zw} 는 x, y, z 방향의 충전수의 단면적(cm^2), P 는 포장재질의 산소투과도($\text{mg cm}/\text{cm}^2 \text{ atm sec}$), m 은 투과된 산소의 양(mg), L_p 는 포장재질의 두께(cm), Δp 는 포장재질 외면의 산소 분압 P_{out} 과 포장재질 내면의 산소 분압 P_{in} 의 차(atm)이다. 포장재질이 충전액과 접한 면에서의 산소

분압인 P_{in} 은 포장재질의 헨리상수 $H(\text{atm} \cdot \text{mL}/\text{mg})$ 를 적용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{ins} = H C_w |_{x_w=0}, \quad (5)$$

외부로부터 확산되어 충전수 안으로 들어간 산소의 총량(M_w)은 다음과 같다.

$$M_w = \int_0^t \int_0^{L_{xw}} \int_0^{L_{yw}} \int_0^{L_{zw}} (1+k) C_w(x_w, y_w, z_w, t) dx_w dy_w dz_w dt - C_{wi} L_{xw} L_{yw} L_{zw} - M_t \quad (6)$$

여기서 M_t 는 두부내의 산소량이다.

충진수 안에서 증가된 박테리아에 의해서 소비된 산소량(M_w^M)은 다음과 같다.

$$M_w^M = \int_0^t \int_0^{L_{xw}} \int_0^{L_{yw}} \int_0^{L_{zw}} k C_w(x_w, y_w, z_w, t) dx_w dy_w dz_w dt \quad (7)$$

충진수 안에서 증가된 총 박테리아의 수(N_w)는 다음과 같다.

$$N_w = K_s M_w^k \quad (8)$$

여기서 K_s 는 K_2/K_1 이고 K_1 은 dM_w^M/dt 이고 K_2 는 dN_w/dt 이다.

두부에서 산소확산 및 미생물에 의한 산소소모의 수학 모델

두부에서의 산소에 관한 물질전달 수학적 수치식은 다음과 같다.

$$D_t \left[\frac{\partial^2 C_t}{\partial x_w^2} + \frac{\partial^2 C_t}{\partial y_w^2} + \frac{\partial^2 C_t}{\partial z_w^2} \right] - \varepsilon k C_t = \varepsilon \frac{\partial C_t}{\partial t} \quad (9)$$

I.C., $t=0$, 모든 x_t, y_t, z_t 에서 $C_t = C_{ti}$ (산소의 초기농도)

B.C. $t>0$,

$$x_t=0, C_t=H_i C |_{x_w=L_{xw}}, x_t=L_{xt}/2, C/x_t=0$$

$$y_t=0, C_t=H_i C |_{y_w=L_{yw}}, y_t=L_{yt}/2, C/y_t=0$$

$$z_t=0, C_t=H_i C |_{z_w=L_{zw}}, z_t=L_{zt}/2, C/z_t=0$$

여기서 D_t 는 두부 내 산소확산계수(cm^2/sec)이고, ε 는 두부의 공극율, C_t 는 산소농도(mg/mL), x_t, y_t, z_t 는 두부 안의 x, y, z 방향의 거리(cm)이다.

외부로부터 확산되어 두부 안으로 들어간 총 산소의 양(M_t)은 다음과 같다.

$$M_t = \int_0^t \int_0^{L_{xt}} \int_0^{L_{yt}} \int_0^{L_{zt}} (1+k) C_t(x_t, y_t, z_t, t) dx_t dy_t dz_t dt - C_{ti} L_{xt} L_{yt} L_{zt} - M_i \quad (10)$$

두부 안에서 증가된 박테리아에 의해서 소비된 산소의 양(M_t^M)은 다음과 같다.

$$M_t^M = \int_0^t \int_0^{L_{xt}} \int_0^{L_{yt}} \int_0^{L_{zt}} k C_t(x_t, y_t, z_t, t) dx_t dy_t dz_t dt \quad (11)$$

두부 안에서 증가된 총 박테리아의 수(N_t)는 다음과 같다.

$$N_t = K_s M_t^k \quad (12)$$

여기서 K_s 는 K_2/K_1 이고 K_1 은 dM_t^M/dt 이고 K_2 는 dN_t/dt 이다.

계산 과정

위의 계산식은 무차원화된 후에 유한차분법이 적용되었으며, $X_w=0, Y_w=0, Z_w=0$ 에서의 경계조건식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 &B.C. \ t > 0, \\
 &x_w = 0, \\
 &C_w = [(P_{out})P(x_w) + (L_p)(D_w)(C_w|_{x_w = \Delta x_w})] / [(D_w)(L_p) + (H)P(x_w)] \\
 &y_w = 0, \\
 &C_w = [(P_{out})P(y_w) + (L_p)(D_w)(C_w|_{y_w = \Delta y_w})] / [(D_w)(L_p) + (H)P(y_w)] \\
 &z_w = 0, \\
 &C_w = [(P_{out})P(z_w) + (L_p)(D_w)(C_w|_{z_w = \Delta z_w})] / [(D_w)(L_p) + (H)P(z_w)] \\
 &C|_{K_w = 0} = \frac{(P_{out})P(\Delta x_w) + (D_w)(L_p)(C|_{K_w = \Delta K_w})}{(D_w)(L_p) + (H)P(\Delta x_w)} \quad (13)
 \end{aligned}$$

Equations(6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13)을 계산하기 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였으며, 프로그램에 필요한 parameters는 Table 1에 나타내었다.

결과 및 고찰

컴퓨터 수치 묘사

Table 2에 보여진 두부 포장 모델에 사용된 산소투과도, 충전수로 산소의 확산 및 용해도, 미생물에 의해 소비되는 산소량, 반응상수 등에 대한 기본 값을 설정하여 사용하였고, Kim(9) 등에 보고된 액체 식품시스템에서의 산소 확산계수 및 산소의 수분용해도는 $2.1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 와 $24.6 \text{ atm} \cdot \text{mL}/\text{mg}$ 의 값으로 각각 적용하였다. 적용 상수수치의 값은 모델 프로그램 계산을 위하여 외부로부터 포장재에 투과된 산소농도에 상관하여 미생물의 성장을 고려한 수치 묘사에 지배적인 영향을 가지는 요소로 나타났다.

미생물에 의해 소모된 총 산소량

호기성 부패균인 *Acinetobacter calcoaceticus*에 의한 상온에서 소모된 산소량은 Fig. 4에 나타내었다. 12시간 동안의 부패균 성장을 예측한 결과 충전수에서 부패균에 의해 소모된 산소농도가 0.38 mg/mL, 그리고 고행 두부에서 부패균에 의해 소모된 산소농도는 0.07 mg/mL로 충전수에서 소모된 산소량이 두부에서 소모

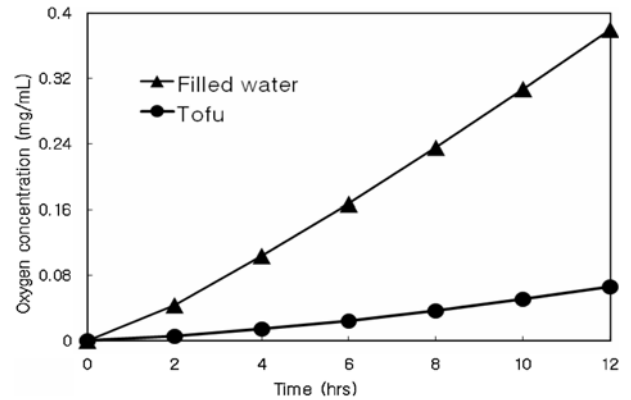


Fig. 4. The amount of oxygen consumed by *Acinetobacter calcoaceticus* in tofu packages at 25°C.

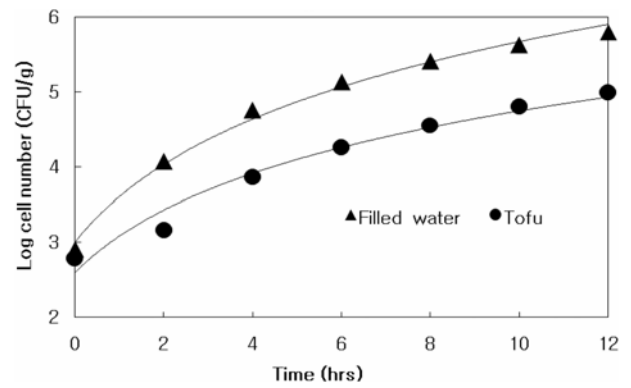


Fig. 5. Predictive model curve for growth of *Acinetobacter calcoaceticus* in tofu packages at 25°C.

된 산소농도보다 약 5배 이상 높은 것을 알 수 있다. 이 결과는 충전수의 부피가 더 작음에도 불구하고 미생물에 의해서 산소가 더 많이 소모되었으며, 외부 환경으로부터 두부 포장을 통해 들어오는 산소의 양이 두부보다 충전수에 더 많이 용해되어 있어 충전수의 산소가 더 많이 소비된 것을 알 수 있다.

증식된 미생물 수

저장 중 포장 두부에서 생성된 부패균의 생균수를 Fig. 5에서 비교해 보면 12시간 후의 충전수에서 5.80 CFU/g의 균수를 예상할 수 있었으며 충전수 안에서 증가한 미생물의 수가 고행 두부 안에서 보다 많음을 알 수 있었다. 고행 두부에서도 비례적으로 균수의 증가를 볼 수 있었으나 충전수에 비해 상대적으로 증식된 미생물 수가 낮음을 보여주고 있다. 포장두부의 시간에 따른 미생물수 변화 모델 결과는 계맛살의 위해 미생물인 *Listeria*

Table 1. The parameters used in computer program

Parameters	Symbol
Oxygen diffusion coefficient of the filled water	(D)
Oxygen solubility in the filled water	(H)
Oxygen permeability of packaging material	(P)
Package dimension*	(L _{w_x} , L _{w_y} , L _{w_z})
Tofu dimension*	(L _{t_x} , L _{t_y} , L _{t_z})
Porosity of tofu*	ε

*Pre-determined

Table 2. Values of parameters used in the mathematical modeling

Parameters	Values	References
Diffusion coefficient of oxygen in the filled water	$2.1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$	(9)
Solubility of oxygen in the filled water	$24.6 \text{ atm} \cdot \text{mL}/\text{mg}$	(9)
Permeability of oxygen through the polyethylene packaging material	$4.1 \times 10^{-5} \text{ mg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{atm}$	(10)
Kinetic reaction rate constant	$0.000005 \text{ sec}^{-1}$	(8)
Ratio of the bacteria growth to the amount of oxygen consumed by microorganisms	$3000 \text{ CFU}/\text{mg}$	(8)
Initial concentration of oxygen	$0.0023 \text{ mg}/\text{mL}$	measured
Initial load of the filled water	10 cm^3	measured
Porosity of tofu	0.85	Pre-determined

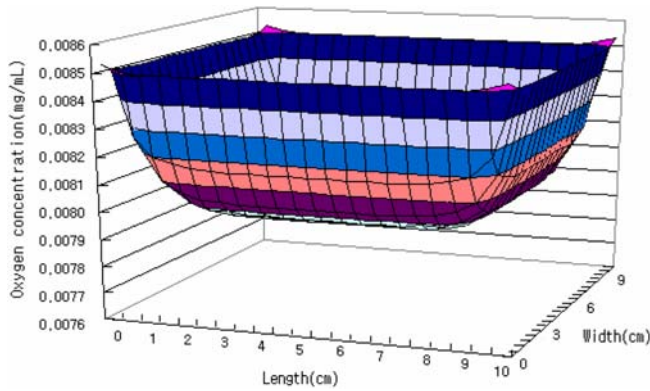


Fig. 6. Oxygen concentration profile in the filled water at 25°C.

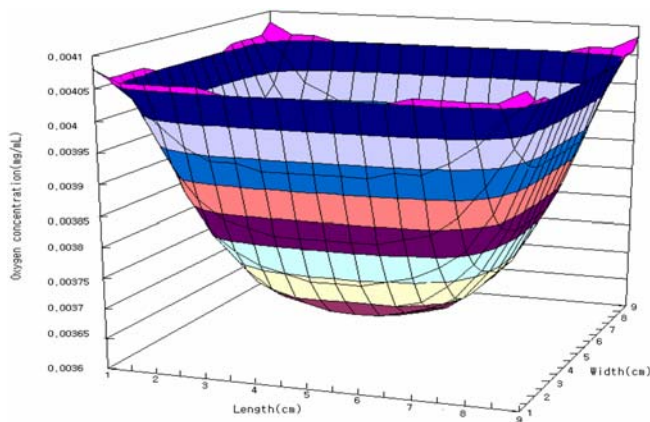


Fig. 7. Oxygen concentration profile in the solid Tofu at 25°C.

monocytogenes 성장모형을 예상한 Moon 등(11)에 의한 연구 결과와 유사한 예측 성장곡선을 보여주고 있다. 또한 이 결과는 Fig. 4에서 보여진 산소농도의 증가율과도 상관관계가 있음을 보여준다. 이는 포장된 두부의 보관수명은 고형 두부자체의 미생물 수 보다 충전수의 미생물 수에 의해서 결정됨을 알 수 있다.

두부포장의 산소농도 분포

충진수와 고형 두부 공극내 수분에서의 산소농도 분포값을 비교했을 때 충전수의 부피가 고형 두부 공극내 수분보다 작음에도 불구하고 충전수내 미생물에 의해서 산소가 더 많이 소모되었다. 이것은 포장재 외부로부터 들어오는 산소 분자가 고형 두부 공극내 수분보다 충전수에 더 많은 양으로 용해되어 결과적으로 충전수에서 산소가 더 많아서 미생물 성장에 영향을 주게 된다. Fig. 5에서 보여준 결과와 같이 충전수 안에서 증가한 미생물의 수가 두부 안에서 보다 많다. 결과적으로 충전수에서 증가된 미생물에 의해 충전수에 용해되어 있는 산소 분자를 소비하게 된다. 따라서 포장된 두부의 보관수명은 두부자체 공극내 수분에서의 미생물수 보다 충전수내의 미생물수에 의해 더 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

충진수 및 고형두부에서 시간에 따른 산소농도 분포 변화

포장두부의 충전수 깊이별로 저장시간에 따른 산소농도 변화를 모델화하여 관찰하였다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 용기 덮개 부분을 중심으로 네 꼭지점에서 산소농도가 가장 높았으며, 충전수의 깊이에 따라 산소농도가 낮아짐을 보여 주고 있다. 따

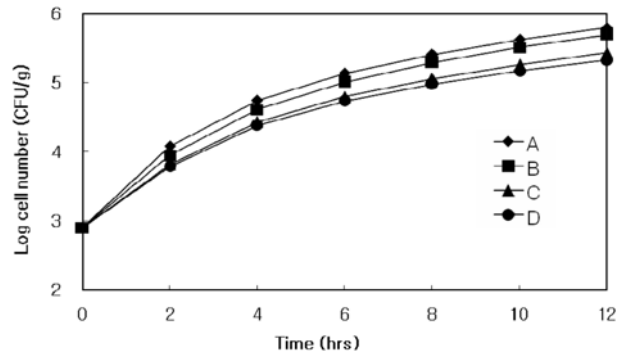


Fig. 8. Predictive model curves on the microbial growth in tofu packaging materials with different oxygen permeability rates at 25°C. ◆ A: $4.1 \times 10^{-5} \text{ mg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{sec}$ ■ B: $4.1 \times 10^{-6} \text{ mg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{sec}$ ▲ C: $4.1 \times 10^{-7} \text{ mg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{sec}$ ● D: $4.1 \times 10^{-8} \text{ mg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{sec}$

라서 3차원 수학적 모델예측을 통한 충전수에서 산소농도 분포는 충전수의 좌우 필름벽면에 떨어진 거리에 따라서 차이가 많이 나고 있음을 알 수 있다. 그러나 각 4면의 꼭지점 부분의 깊이에서는 2시간 후에는 산소농도가 거의 일정함을 볼 수 있다. 한편 두부 용기 가운데 부분은 고형 두부 제품이 들어 있어 산소농도 분포 예측이 어려울 뿐만 아니라 매우 낮은 산소농도로 산소농도 분포도를 나타내지 않고 있다. 고형 두부에서의 산소농도의 시간에 따른 변화도 Fig. 7에서 나타나고 있듯이 두부 표면의 4 모서리 부분의 농도가 가장 높고, 가운데 부분으로 갈수록 가장 낮음을 알 수 있다. 그리고 고형 두부의 깊이에 따라서 농도 차이가 많이 나고 있음을 알 수 있다. 이는 고형 두부에서의 산소농도가 일정 수준 상태에 도달하는 시간이 충전수에서 보다 고형 두부에서 길어지는 결과를 나타내었다.

포장시스템의 물리적 성질의 영향

포장시스템의 물리적 성질인 포장재의 산소투과도, 충전수 내의 확산계수, 초기농도, 충전수의 깊이 등이 보관수명에 미치는 영향을 Table 1에 나타난 수치들을 기준 값으로 하고 수치 묘사하려는 물리적 성질의 값을 변화시키면서 관찰하였다. 포장재 특성에 따른 각각 다른 산소투과도를 고려하여 4.1×10^{-5} , 4.1×10^{-6} , 4.1×10^{-7} , $4.1 \times 10^{-8} \text{ mg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{sec}$ 의 값을 모델 계산에 적용하여 성장되는 미생물의 수를 예측한 결과(Fig. 8), 포장재의 산소투과도가 크면 클수록 미생물의 수는 증가하고 있다. 또한 증가된 미생물 수에 의해 소비된 산소량은 증가할 것이며 포장된 두부의 보관수명은 현저히 떨어진다. 포장재의 산소투과도(P)가 $4.1 \times 10^{-5} \text{ mg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{sec}$ 보다 클 때는 포장된 두부의 보관수명의 산소투과도에 대한 의존도는 크지 않다. Fig. 9의 충전수 내의 산소 분자 확산계수의 크기가 미생물의 산소 소모량에 미치는 영향은 Fig. 8의 포장재의 산소투과도가 미치는 영향과 유사하였다. 본 연구의 시스템 조건에서 충전수 내의 확산계수(D)가 $2.1 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 보다 크면 확산계수 크기의 영향은 크지 않았다. 충전수의 산소 분자 확산계수는 다음 식으로 표현되므로 충전수의 점도는 산소 확산계수에 반비례하는 효과를 가질 것으로 판단된다.

$$D = \frac{K_B T}{6\pi\mu R_0} \tag{14}$$

여기서 K_B 는 볼츠만 상수($1.38 \times 10^{-16} \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{sec}^2 \text{ K}$), T는 온도

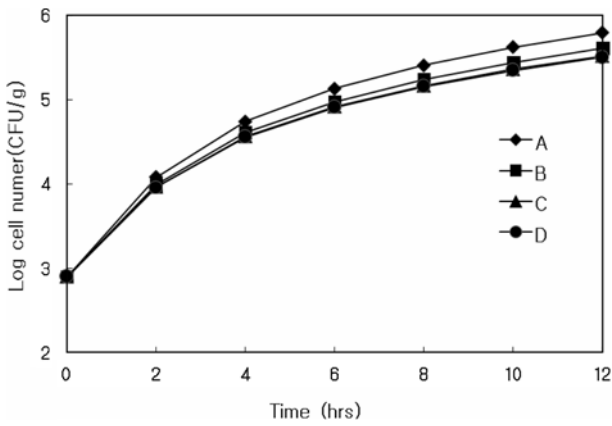


Fig. 9. Predictive model curves on the microbial growth in tofu packaging materials with different oxygen diffusion coefficients at 25°C. ◆ A: 2.1×10^{-5} cm/sec² ■ B: 2.1×10^{-6} cm/sec² ▲ C: 2.1×10^{-7} cm/sec² ● D: 2.1×10^{-8} cm/sec²

(K), R_0 는 산소의 반지름(cm), μ 는 충전수의 점도(g/cm³·sec)이다. 이와 함께 두부 부패균의 최대 증식속도상수, 온도 및 초기 균수에 따른 두부 보관수명에 미치는 영향은 Shin(12)이 선정한 Gompertz 변형에 의해 두부 부패균의 성장 예측모델에 적용하여 유통기간을 예측하였다. 그 결과 *Acinetobacter calcoaceticus* 두부 부패세균의 경우 초기 균수는 최대 증식속도 상수에 큰 영향을 끼치지 않으며 온도에 의해 지배적인 영향을 받는다고 보고하였다. 이와 관련하여 본 연구 결과는 두부의 유통기간은 포장재 내에 투과되는 산소농도에 따라 크게 영향을 받는다고 예측되며 부패 미생물의 성장에 필요한 산소에 기여하는 정도가 초기 산소량보다는 포장재를 통해서 투과되는 산소량이 더 중요하다고 평가된다. 따라서 두부 포장재의 높은 산소 차단특성은 포장된 두부의 유통기간 연장에 직접적으로 영향을 주리라 예측할 수 있다.

요 약

포장된 두부의 유통기간 중 두부 포장재를 통해 유입되는 산소량에 따른 두부 및 충전수에 미생물 성장률을 기준으로 두부의 유통기간을 예측하고자 하였다. 미생물 균의 성장 및 두부 포장재를 통해 유입된 산소량의 변화를 3차원적 수치 묘사의 수학적 모델로 정량적으로 예측하였으며, 이를 위해 산소의 확산 메커니즘 원리를 고려한 유한차분해석법을 적용하여 개발하였다. 3차원적 수치묘사의 수학적 모델을 통한 예측 결과는 미생물의 수

가 두부 제품보다 충전수에 더 높은 것으로 나타났다. 따라서 포장된 두부의 유통기간은 두부 제품의 미생물 수뿐만 아니라 충전수의 미생물 수에도 영향을 끼치리라 예측된다. 두부 제품의 물리적 특성, 적용된 포장재의 산소투과율 및 충전수의 깊이 등에 따라 포장된 두부의 유통기간에 영향을 주는 것을 관찰하였다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 연세대학교 학술비 지원(2003-5-0023)으로 수행한 결과로서 이에 감사드립니다.

문 헌

- Quast DG, Karel M. Computer simulation of storage life of foods undergoing spoilage by two interacting mechanisms. *J. Food Sci.* 37: 165-169 (1972)
- Fennema PR. Vitamins and minerals. pp. 477-482. In: *Food Chemistry*. Fennema PR. (ed). Marcel Dekker, Inc., New York, NY, USA (1986)
- Peppas NA, Khanna R. Mathematical analysis of transport properties of polymer films for food packaging II. Generalized water vapor models. *Polym. Eng. Sci.* 26: 281-289 (1979)
- Barron HF. Finite element computer simulation of oxygen diffusion in packaged liquids. *Packag. Technol. Sci.* 6: 311-321 (1993)
- Han BZ, Rombouts FM, Robert Nout MJ. A Chinese fermented soybean food. *Int. J. Food Microbiol.* 65: 1-10 (2001)
- Kim YS, Choi YM, Noh DO, Cho SY, Suh HJ. The effect of oyster shell powder on the extension of the shelf life of *tofu*. *Food Chem.* 103: 155-160 (2007)
- Tang CH, Li L, Wang JL, Yang XQ. Formation and rheological properties of 'cold-set' *tofu* induced by microbial transglutaminase. *LWT-Food Sci. Technol.* 40: 579-586 (2007)
- Srivastava S, Srivastava AK. Biological phosphate removal by model based fed-batch cultivation of *Acinetobacter calcoaceticus*. *Biochem. Eng. J.* 40: 227-232 (2008)
- Kim JN, Harte BR. Three-dimensional oxygen diffusion into a packaged liquid food system with simultaneous oxidation of vitamin C. *Food Sci. Biotechnol.* 5: 316-321 (1996)
- Hernandez RJ, Selke EM, Culter JD. Major plastics in packaging. pp. 89-102. In: *Plastics Packaging: Properties, Processing, Applications, and Regulations*. Hanser Gardner Publications, Inc., Cincinnati, OH, USA (2000)
- Moon SY, Woo GJ, Shin IS. Development of predictive growth model of *Listeria monocytogenes* using mathematical quantitative assessment model. *Korean J. Food Sci. Technol.* 37: 194-198 (2005)
- Shin IS. Development of shelf life prediction model of *tofu* using mathematical quantitative assessment model. *Food Ind. Nutr.* 10: 11-16 (2006)