

오징어 염지공정에서 물질전달의 수학적 모델링

이낙훈 · 박민 · 박진홍 · 인예원 · 오상엽¹ · 조형용*

차의과학대학교 식품생명공학과, ¹서울대학교 전기정보공학부

Mathematical Modeling of Mass Transfer in Squid (*Todarodes pacificus*) Slices During Brining Process

Nak Hun Lee, Min Park, Jin-Hong Park, Ye-Won Yin, Sang-Yup Oh¹, and Hyung-Yong Cho*

Department of Food Science and Biotechnology, CHA University

¹School of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

Abstracts

Todarodes pacificus is an important marine resource commercialized in South Korea, Japan, and China. The objective of this work is to investigate the effectiveness of different mathematical models (diffusive model, Newton's model, Henderson-pabis's model, Page's model, and Weibull's model) in precisely explaining the moisture gain/loss and salt gain of the squid slices immersed in saline solutions. Brine concentrations of immersion used were 2.5, 5, 10, and 15% (w/w) for various durations (0-360 min). The effective diffusion coefficients of salt ranged from 0.549×10^{-9} to 0.841×10^{-9} m²/s, while the moisture values ranged from -0.077×10^{-9} to 0.374×10^{-9} m²/s. The experimental results of moisture and salt transfer fitted well into the Henderson-Pabis and Page models, respectively. The results presented in this study support the potential to predict the mass transfer of squid using mathematical modeling.

Key words: squid, impregnation, mass transfer, mathematical model, osmotic dehydration

서 론

오징어는 맛과 식감이 독특하여 아시아와 지중해 국가에서 인기 있는 해산물이다(Benjakul et al., 2000; Canto et al., 2012; Gou et al., 2012). 현재 상업적으로 유통되는 오징어는 미생물 오염과 영양 손실을 최소화하기 위해 냉동 또는 건조 제품으로 판매된다(Benjakul et al., 2000; Gou et al., 2010). 냉동 제품의 경우 유통과정 및 공정과정에 온도유지 시스템을 필요로 하고 건조 제품의 경우 오징어의 신선도를 크게 떨어뜨린다는 단점이 있다(Hugas et al., 2002; Deng et al., 2014; Núñez-Mancilla et al., 2011). 이러한 단점들을 보완하기 위해 염지공정(brining processes)이 사용되고 있다.

NaCl 수용액을 사용하는 염지공정은 물질전달 공정을 가속화 할 수 있고(Barat et al., 2002) 식품 본연의 특성에 큰 영향을 미치지 않고 보수력(water holding capacity,

WHC), 영양, 관능 및 기능적 특성을 증진시키고 육류 보존성을 높일 수 있어 식품 산업에서 널리 사용되고 있다(Lemos et al., 1999; Le meste et al., 2002; Lawrie, 2005; Lemus-Mondaca et al., 2009). 이러한 염지공정을 osmotic treatment (OT)라고도 하는데(Collignan et al., 2001; Schmidt et al., 2008a, 2008b), 저농도의 NaCl 수용액(hypotonic solution)으로 OT할 경우 “salting in” 현상이 발생되어 수분 흡수를 증대시키고 근원섬유 내의 물리적인 구조 약화 및 myosin-actin의 상호작용 등을 일으켜 단백질의 용해성이 증가되어 보수력이 증가된다(Offer & Trinick, 1983; Hongsprabhas & Barbut, 1999; Lawrence et al., 2003). 반대로 고농도의 NaCl 수용액(hypertonic solution)으로 OT할 경우 “salting out” 현상이 관찰되며, 식품 내 용해성 물질 및 수분이 수용액으로 이동되는, 즉 탈수가 발생하고 이와 동시에 반대 방향으로 용질의 이동이 일어난다. 이는 단백질 불용화 작용 때문이라고 보고되었다(Graiver et al., 2009). 이러한 물질전달 현상에는 삼투, 확산 및 유체 역학 등의 메커니즘이 동시에 관여하게 된다(Rastogi et al., 2000; Rastogi et al., 2002). 염지공정 동안 발생하는 물질전달 동역학에 수학적 모델링(mathematical modeling)을 적용하면 해당 메커니즘들에 의한 영향을 예측하는데 도움이 될 수 있다.

*Corresponding author: Hyung-Yong Cho, Department of Food Science and Biotechnology, College of Life Science, CHA University, Seongnam 463-400, Republic of Korea
Tel: +82-31-881-7125, Fax: +82-31-881-7219
E-mail: hycho5710@hanmail.net
Received September 28, 2020; revised October 22, 2020; accepted October 26, 2020

물질전달 현상에서 염지액의 농도와 같은 공정 변수의 영향을 정량화하기 위하여 수학적 모델링 기법을 사용하고 있고(Crank, 1975; Rastogi & Niranjana, 1998; Rastogi & Raghavarao, 2004), Fick의 제 2 법칙을 응용하여 수분 및 용질 성분의 유효확산 계수를 예측할 수 있다(Mujaffar & Sankat, 2006; Khan et al., 2008; Villacís et al., 2008; Ruiz-López et al., 2010; Lemus-Mondaca et al., 2018). 또한, 수학적 모델링에는 Newton, Henderson-pabis, Page 및 Weibull 등 다양한 실험식(empirical model)들이 적용될 수 있는데(Gallart-Jorner et al., 2007; Corzo & Bracho, 2008; Schmidt et al., 2009; Uribe et al., 2011; VegaGálvez et al., 2011; Assis et al., 2016; Aregbesola et al., 2015), 실험을 통해 얻은 정량적 데이터를 실험식들에 대입하여 각 실험식들에 존재하는 변수 값을 산출한 뒤 실험식을 통해 나온 예측값과 실험을 통해 얻은 실험값을 비교하여 가장 일치하는 실험식을 선택하게 되면 특정 수분 및 NaCl 함량을 갖는 제품을 만드는데 필요한 염지 시간 및 농도 등을 예측할 수 있기 때문에 기술적으로 매우 중요하다(Schmidt et al., 2008b). 오징어의 염지공정에서 농도에 따라 변화하는 물질 전달 동력학에 대한 연구에 수학적 모델 및 이의 실험식을 적용한 경우는 아직 제한적이다(Ozuna et al., 2015).

따라서, 본 연구에서는 첫째, 오징어를 2.5, 5.0, 10.0 및 15.0% (w/w)의 염지액에 염지하여 수분 및 NaCl의 이동을 측정하여 염지액 농도의 영향을 확인하고자 하였다. 둘째, 실험을 통해 획득한 정량적 데이터를 수학적 모델에 적용하여 산출한 예측값과 실험값을 비교하여 최적의 실험식을 확인하고자 하였다. 셋째, 물질전달 현상이 평형에 도달했을 때의 시료로 물성 평가를 하여 염지공정에 의한 오징어 연화 가능성을 확인하고자 하였다.

재료 및 방법

공시재료 및 염지조건

본 연구에서 사용한 오징어(*Todarodes pacificus*)는 충청남도 서천군 흥원항 소재의 수산시장에서 구매한 뒤 산채로 연구실까지 운송하여 깨끗한 물로 수세한 뒤 껍질, 머리, 다리 그리고 내장을 제거하여 몸통(140-160 mm)만을 진공포장하여 -20°C에서 보관하였다. 염지액의 식염농도는 2.5, 5, 10 및 15% (w/w)가 되도록 조제하였다. 냉동된 오징어는 사용 전에 4°C 냉장고에서 24시간 해동하였고 해동된 오징어는 slice형태(30×30 mm)로 정형하였으며, 그 두께는 4.5±0.5 mm 였다. 염지는 오징어를 염지 용액에 1:8 (w:w)의 비율로 염지시켜 진행하였고 1, 5, 10, 5, 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300 및 360분 동안 염지 시킨 후 표면의 과도한 수분을 제거하여 처리 전·후의 수분함량 및 소금함량을 측정하였고, 360분 염지 후의 시료를 이용하여

물성 변화를 측정하였다.

수분함량 및 소금함량

시료의 수분함량(moisture content)은 105°C 상압 가열 건조법에(AOAC, 2000)에 의해 측정하였다. 소금 함량(salt content)은 Volhard법 (AOAC, 2000)에 의해 0.1 N NH₄SCN으로 적정하여 시료 중의 NaCl양을 측정하였다. 수분 및 소금 함량은 kg of moisture/kg of initial dry solids (ids) 및 kg of NaCl/kg of initial dry solids (ids)로 각각 표현하였다. 실험은 각 처리구 당 3번 반복 측정을 실시하여 평균 및 표준편차를 기록하였다.

보수력(water holding capacity, WHC)

초기 시료의 수분함량(m₀)을 측정하였고, 시료를 염지액에 360분 염지시킨 후에 표면에 있는 과도한 수분을 제거하여 수분함량(m₃₆₀)을 측정하였다. 측정된 값을 식 (1)에 대입하여 WHC 값을 산출하였다(Graiver et al., 2006). 각 조건에 따른 시료는 3회 반복 측정하였다.

$$WHC = \frac{m_{360} - m_0}{m_0} \quad (1)$$

물성 측정(texture profile analysis, TPA)

시료의 물성 측정을 위하여 염지 후 시료의 표면에 있는 과도한 수분을 제거한 뒤 3개의 시료를 무작위로 선별하였다. 시료의 물성은 texture analyzer (CT3-4500, Brookfield Engineering Laboratories, Inc. Middleboro, MA, USA)를 이용하여 상온에서 측정하였다. 분석조건은 TA-25/1000 50.8 mm D probe를 장착하여 pre-test 1.0 mm/s post-test speed 1.0 mm/s, test speed 1.0 mm/s, deformation 25% 그리고 trigger load 10.0 g으로 설정하였다. 물성 분석은 TexturePro CT (V1.5 Build20; Brookfield Engineering Laboratories.)로 경도(hardness, g), 탄력성(springiness, mm), 응집성(cohesiveness) 및 씹음성(chewiness, mJ)을 기록하였다.

Diffusive model

확산에 대한 Fick의 두 번째 법칙을 적용하여 유효확산 계수를 추정하기 위하여 실험을 통해 얻은 수분과 소금의 함량을 수분과 소금 함량을 미달성 수분의 이동 비율(MR)과 소금의 이동 비율(SR)로 전환하였고 각각 식 (2)과 식 (3)로 나타낸다.

$$MR = \frac{m_t - m_\infty}{m_0 - m_\infty} \quad (2)$$

$$SR = \frac{s_1 - s_\infty}{s_0 - s_\infty} \quad (3)$$

그다음 semi-infinite slab에서의 Fick의 두 번째 법칙을 따른 해석은 수분과 용질에 따라 식 (4)로 나타낸다(Crank J, 1975).

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{8}{(2i-1)^2 \pi^2} \exp\left(\frac{-D_e(2i-1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right) \quad (4)$$

그러므로 해석 해를 통해 각각 소금과 수분의 유효 확산 계수를 추정하기 위해 식 (5)와 식 (6)로 나타내었다.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-D_{we} \pi^2 t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

$$SR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-D_{se} \pi^2 t}{4L^2}\right) \quad (6)$$

여기서, MR은 미달성 수분이동 비율, SR은 미달성 NaCl 이동 비율, m_t (kg of moisture/kg of initial dry solids)은 수분함량, s_t (kg of NaCl/kg of initial dry solids)는 용질 함량이고 m_0 및 s_0 는 초기 수분 및 용질 함량, m_{∞} 및 s_{∞} 는 평형에서 수분 및 용질 함량, m_t 및 s_t 는 염지 시간에 따른 수분 및 용질 함량, D_{ew} 및 D_{es} 는 수분 및 NaCl의 유효 확산계수이며, t 는 시료의 침지 시간(min) 그리고 L 은 특성 길이로 두께의 절반을 의미한다(m).

Mathematical models

확산모델에서와같이 실험을 통해 얻은 MR과 SR을 Newton, Henderson-Pabis, Page 그리고 Weibull의 4 가지 수학적 모델에 적용하였다(Togrul İT & Pehlivan D, 2003; Ertekin C & Yaldiz O, 2004; Sobukola OP et al., 2008; Vega-Gálvez A et al., 2008; Uribe E et al., 2011; Lemus-Mondaca R et al., 2018). 식은 각각 (7), (8), (9) 및 (10)으로 나타내었고 Newton과 Henderson-Pabis의 모델은 선형회기 방법으로 Excel (Microsoft office, Ver. 2010, Redmond, USA)을 통해 추정되었고 Page와 Weibull의 모델은 비선형회기 방법으로 Matlab (Matlab, Ver. 2016a, Boston, USA)을 사용하였다.

$$\text{Newton} \quad MR \text{ or } SR = \exp(-k_1 t) \quad (7)$$

$$\text{Henderson-Pabis} \quad MR \text{ or } SR = a \exp(-k_2 t) \quad (8)$$

$$\text{Page} \quad MR \text{ or } SR = \exp(-k_3 t^n) \quad (9)$$

$$\text{Weibull} \quad MR \text{ or } SR = \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (10)$$

Statistical evaluation of models

적용된 모델의 시료에 대한 적합성을 평가하기 위하여 결정 계수(R^2), 전체 제곱 합(SSE), 평균 제곱근 편차

(RMSE) 그리고 카이 제곱 (χ^2) 검정을 수행하였다.

$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{ei} \text{ or } SR_{ei} - MR_{ci} \text{ or } SR_{ci})^2 \quad (10)$$

$$SE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{ei} \text{ or } SR_{ei} - MR_{ci} \text{ or } SR_{ci})^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{ei} \text{ or } SR_{ei} - MR_{ci} \text{ or } SR_{ci})^2}{N - z} \quad (12)$$

여기서, MR_{ei} 와 SR_{ei} 는 실험을 통해 얻은 MR과 SR이고, MR_{ci} 와 SR_{ci} 는 모델을 통해 추정된 MR과 SR을 의미한다.

통계처리

통계분석은 SPSS 통계프로그램(Statistical Package for the Social Science, Ver. 21.0 SPSS Inc., Chicago, USA)을 이용하여 각 측정군의 평균과 표준편차를 산출하고 처리 간의 차이 유무를 one-way ANOVA (Analysis of variation)로 분석한 뒤 Duncan's multiple range test를 이용하여 $p < 0.05$ 수준에서 유의성을 검정하였다.

결과 및 고찰

염지액의 농도에 따른 오징어의 m_t , s_t , WHC 및 유효확산계수

오징어를 NaCl 농도 2.5, 5, 10 및 15% (w/w)로 제조한 염지액에 일정 시간에 따라 염지시켰을 때 오징어의 수분 함량 및 용질 함량을 각각 Fig. 1 및 Fig. 2에 나타내었다. 초기 오징어의 수분함량과 NaCl함량은 각각 $75.59 \pm 0.64\%$ 및 $0.18 \pm 0.02\%$ 로 관찰되었다. Chiralt & Fito (2003)에 따르면 염지 중에 염지액은 상시 유동성을 가지고 있어서 오징어의 근육이 다소 변형될 수 있고 염지액과 오징어의 삼투압 차에 의해 오징어 내/외부로 수분과 소금의 이동이 이루어진다고 보고하였다. Fig. 1 및 Fig. 2에 나타난 바와 같이 m_t 는 NaCl 농도가 높아질수록 감소하는 모습이 관찰되었고 s_t 는 NaCl 농도가 높아질수록 증가하는 모습이 관찰되었다. 2.5, 5 및 10% 농도의 염지액에 염지시킨 경우 염지시간이 증가할수록 수분함량이 증가하는 모습이 관찰된 반면 15%에서는 수분함량이 감소하는 모습이 관찰되었다. NaCl 함량의 경우 모든 농도의 염지액에서 염지시간이 증가할수록 NaCl 함량이 증가하는 모습이 관찰되었다.

앞서 말한 염지액 농도로 제조한 염지액에 360분 염지시켰을 때 오징어의 WHC값을 계산하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 WHC는 염지액의 농도가 높아질수록 감소하는 모습이 관찰되었고 2.5, 5 및 10% 농도 염지액에 염지시킨 시료의 WHC는 양의 값을 나타냈으므로 수분을 흡수하는 수화현상이 발생했고 15%

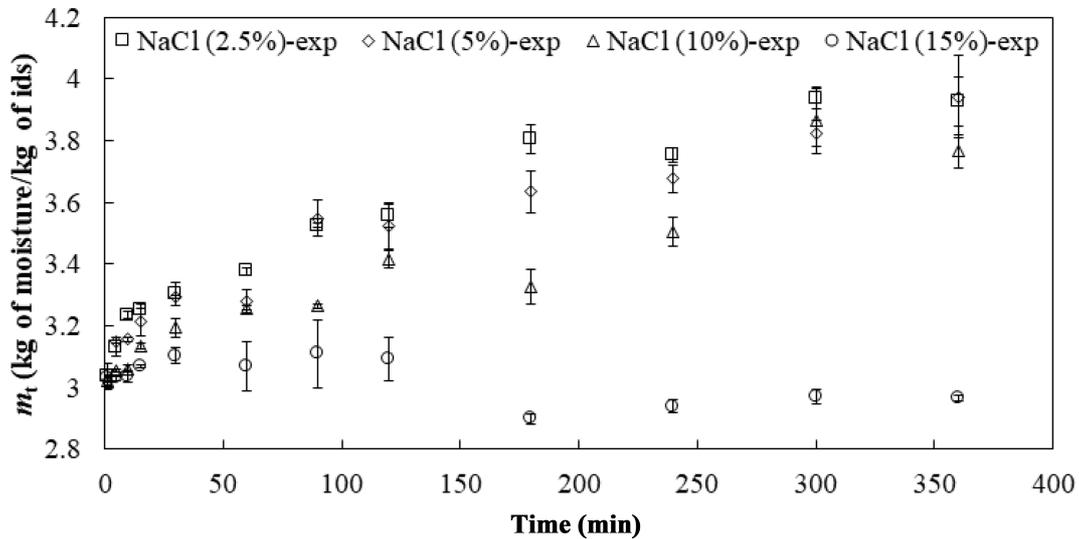


Fig. 1. Moisture transfer during immersion of squid samples at different brine concentration.

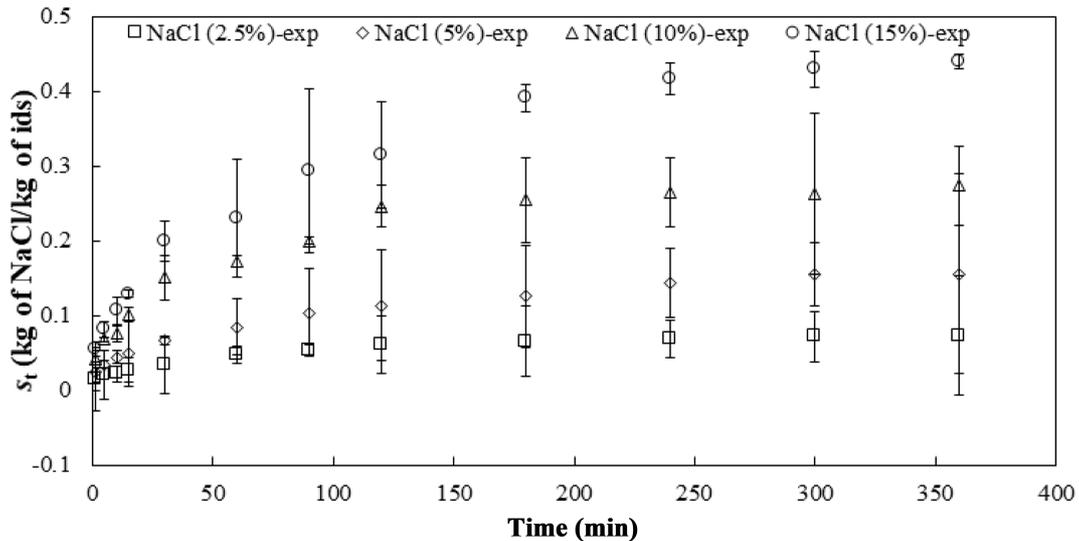


Fig. 2. NaCl transfer during immersion of squid samples at different brine concentration.

농도 염지액에 염지시킨 시료의 WHC는 음의 값을 나타냈으므로 탈수 현상이 발생했다고 판단되었다. 염지 시에 보수력이 높아진 결과는 염지 중에 NaCl 농도구배에 따라 시료 내부로 침투된 Cl⁻ 이온이 근원섬유 단백질과 결합하여 정전기적 반발력을 증폭시켜 액틴과 미오신의 사이에 공간을 넓혀 넓혀진 공간 사이에 수분이 침투됨에 따라 보수력을 높이기 때문이라고 보고되어 진다(Offer & Trinick, 1983). 반면에, 염지 시에 보수력이 낮아진 결과는 염지액과 시료간의 수분활성도 차이에 의하여 염지액의 수분활성도가 시료보다 낮아 삼투압이 높은 고장액의 효과로 수분이 빠져나오는 현상이라고 보고되어 진다(Barat et al., 2002). NaCl 6% 이상의 수용액을 사용할 경우 굵은 미오신 섬유가 해중합(depolymerization)되기 시작하고 근육이 수축하게 되어 보수력을 저하시킨다고 알려져 있는데(Offer

& Trinick, 1983; Paterson et al., 1988), 본 연구에서는 2.5% 염지액에 염지시킨 경우 가장 높은 보수력이 측정되었고 농도가 높아질수록 보수력이 감소하는 모습이 관찰되었다. 마찬가지로 Schmidt et al. (2008b)의 연구에서 5% 염지액에 염지시킨 경우 수분함량 가장 높았고 염지액 농도가 높아질수록 수분함량이 감소한다고 보고하였다.

물질전달 특성을 비교하기 위해 오징어를 NaCl 농도 2.5, 5, 10 및 15% (w/w)로 제조한 염지액에 염지시켰을 때 수분과 NaCl의 유효확산 계수를 계산하여서 Table 1에 나타내었다. 수분 및 NaCl의 유효확산 계수의 범위는 각각 -0.077×10^{-9} 에서 $0.374 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 및 0.549×10^{-9} 에서 $0.841 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 수분의 유효확산 계수의 경우 염지액 농도가 높아질수록 값이 감소하는 경향이 나타났고 반면에, NaCl의 유효확산 계수의 경우 염지액 농도가 높아질수록 값이

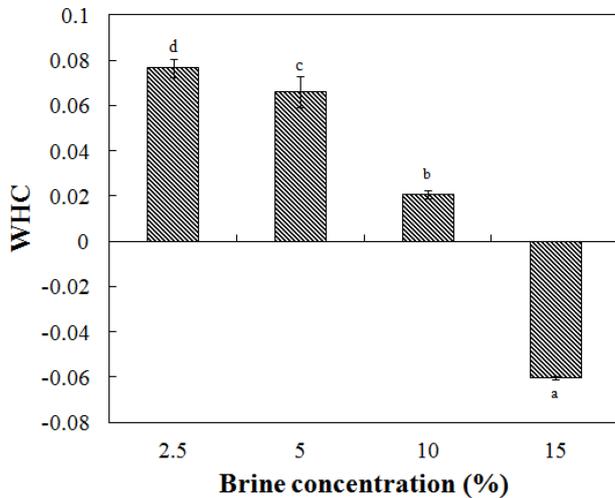


Fig. 3. Water holding capacity (WHC) of squid samples using immersion during 360 min.

증가하는 경향이 관찰되었다.

Fig. 1, Fig. 3 및 Table 1과 같이 본 연구로부터 염지액 농도가 10% 이하에서 오징어를 염지시킬 때 수화현상이 발생하고 반면에 염지액 농도 15%에서 오징어를 염지시킬 경우 탈수현상이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 수화-탈수에 관한 이전 연구에서 Akse et al. (1993)는 NaCl 농도가 50 g/L 이하의 수용액을 사용하여 근육세포를 염지할 경우 salting-in 효과가 나타나고 90-100 g/L 보다 높은 농도의 수용액을 사용할 경우 salting-out 현상 때문에 수분과 NaCl 간의 강력한 결합을 하게 만들어 단백질을 시료에서 이탈시킨다고 보고하였고 Knight & parsons (1988)에서 토끼 근육을 염지시킨 경우 1 M (58.5 g/L)의 염지액에

Table 1. Diffusion coefficients of solids (D_{se}) and water (D_{we}) and at different brine concentration

Brine concentration (%)	$D_{we} \times 10^{-9}$ (m ² /s)	$D_{se} \times 10^{-9}$ (m ² /s)
2.5	0.374±0.036 ^{b1)2)}	0.549±0.039 ^a
5	0.337±0.059 ^b	0.697±0.028 ^b
10	0.339±0.029 ^b	0.761±0.058 ^{bc}
15	-0.077±0.007 ^a	0.841±0.084 ^c

¹⁾ Different letters in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$).

²⁾ Each data was expressed as the mean±SD of three independent experiments.

서 가장 높은 수분흡수 현상을 보였고, 4.5 M (260 g/L)에서 탈수 현상이 관찰된다고 보고하였다. 뿐만 아니라, Schmidt et al. (2008a)의 연구에 의하면 수화-탈수의 전이는 염지액 농도가 약 13% 일 때 일어나는 것으로 추측하였고 Schmidt et al. (2009)의 연구에 의하면 염지액 농도가 11-14% 사이일 때 수화-탈수의 전이가 일어나는 것으로 추측하였으나, Nguyen et al. (2010)의 연구에서는 대구를 염지시킨 경우 염지액 농도가 15% 이하일 때 흡수 현상이 관찰되고 18% 이상일 경우 탈수 현상이 관찰된다고 보고하였다. 앞선 어류 및 육류 연구 중 육류 연구와 유사하게 본 연구에서 수화-탈수의 전이가 10-15% 사이에서 일어나는 것으로 추측할 수 있었다.

Mathematical modeling

오징어의 염지공정을 시뮬레이션하기 위해 Newton, Henderson-Pabis, Page 그리고 Weibull이 4가지 수학적

Table 2. Model parameters for moisture (MR) and solid (SR) transfer during the immersion of squid at different brine concentrations

Model	Parameters	Brine concentration (%)				
		2.5	5	10	15	
Newton	k_1	MR ($\times 10^{-3}$)	0.0481 ± 0.0037 ^{b1)2)}	0.0432 ± 0.0061 ^b	0.0435 ± 0.0031 ^b	-0.0099 ± 0.0008 ^a
		SR ($\times 10^{-3}$)	0.0705 ± 0.0041 ^a	0.0896 ± 0.0029 ^b	0.0978 ± 0.0061 ^{bc}	0.1080 ± 0.0088 ^c
Henderson-Pabis	k_2	MR ($\times 10^{-3}$)	0.0481 ± 0.0037 ^b	0.0432 ± 0.0061 ^b	0.0435 ± 0.0031 ^b	-0.0099 ± 0.0008 ^a
		SR ($\times 10^{-3}$)	0.0705 ± 0.0041 ^a	0.0896 ± 0.0029 ^b	0.0978 ± 0.0061 ^{bc}	0.1080 ± 0.0088 ^c
	A	MR	0.9342 ± 0.0080 ^a	0.9687 ± 0.0072 ^a	1.1044 ± 0.0409 ^b	1.1993 ± 0.0201 ^b
		SR	0.7597 ± 0.0121 ^b	0.8143 ± 0.0081 ^c	0.7286 ± 0.0086 ^a	0.8143 ± 0.0135 ^c
Page	k_3	MR	0.0067 ± 0.0003 ^b	0.0056 ± 0.0010 ^b	0.0025 ± 0.0006 ^b	-0.1334 ± 0.0602 ^a
		SR	0.0052 ± 0.0009 ^a	0.0053 ± 0.0010 ^a	0.0130 ± 0.0002 ^b	0.0061 ± 0.0014 ^a
	n	MR	0.4826 ± 0.0081 ^b	0.5025 ± 0.0365 ^b	0.5788 ± 0.0421 ^c	-0.0094 ± 0.0035 ^a
		SR	0.5911 ± 0.0350 ^c	0.5723 ± 0.0205 ^{bc}	0.4710 ± 0.0048 ^a	0.5332 ± 0.0173 ^b
Weibull	α	MR	0.7735 ± 0.0164 ^a	0.8175 ± 0.0547 ^{ab}	1.1460 ± 0.0980 ^b	2.1802 ± 0.3439 ^c
		SR	0.6215 ± 0.0300 ^b	0.6618 ± 0.0149 ^b	0.5536 ± 0.0124 ^a	0.6506 ± 0.0286 ^b
	β	MR	19,775.0 ± 1432.0 ^a	20,024.3 ± 2428.0 ^a	18,999.3 ± 653.6 ^a	22,826.3 ± 1.2 ^b
		SR	9,213.0 ± 278.9 ^a	9,052.0 ± 0.0 ^a	9,052.0 ± 0.0 ^a	9,052.0 ± 0.0 ^a

¹⁾ Different letters in the same line indicate significant differences ($p < 0.05$).

²⁾ Each data was expressed as the mean±SD of three independent experiments.

모델을 선택하였고 MR과 SR에 대한 각 수학적 모델의 매개변수 값을 Table 2에 나타내었다. Table 2에 나타낸 바와 같이 MR의 매개변수 값의 경우 k_1 (Newton), k_2 (Henderson-Pabis), and k_3 (Page)는 염지액의 농도가 높아질 경우 감소하는 경향이 관찰되었고 반면에 A (Henderson-Pabis) 및 α (Weibull)는 염지액의 농도가 높아질수록 증가하는 경향이 관찰되었다. n (Page) and β (Weibull)는 염지 공정상에서 명확한 경향성이 관찰되지 않았다. SR의 매개변수 값의 경우 k_1 (Newton), k_2 (Henderson-Pabis)는 염지액의 농도가 높아질수록 증가하는 경향이 관찰되었으나 Henderson-Pabis 모델의 매개변수인 A와 나머지 Page 및 Weibull 모델의 매개변수 값의 경우 염지공정상에서 명확한 경향성이 관찰되지 않았다. Uribe et al. (2011)의 연구에서 점보오징어의 삼투성 탈수 과정에서 수분 및 소금의 물질전달에 온도공정이 미치는 영향을 관찰하였는데 모델의 매개변수 값이 명확한 경향성을 보이지 않는다고 보고하였고 Nuñez-Mancilla et al. (2011)의 연구에서는 압력 처리 공정이 수학적 모델의 매개변수 값에 명확한 변화를 유도하지 않는다고 보고하였다. Perez-Won et al. (2016)의 연구에서 삼투압 농도와 관련하여 수학적 모델의 매개변수가 확산계수의 경향성과 유사하다고 보고하였고 Lemus-Mondaca et al. (2018)의 연구에서는 수학적 모델의 매개변수 중 일부가 압력에 따라 증가하는 경향을 보였고 일부는 압력에 따라 명확한 경향을 보이지 않았다고 보고하였다. 이전 연구들에서 보고된 바와 같이 수학적 모델들의 매개변수 값은 공정에 따라 명확한 경향성을 보이지 않는 경우들이 대다수였고 본 연구에서는 수학적 모델의 매개변수 값들 중 일부는 염지액 농도에 따라 명확한 경향성을 보이기도 했지만 일부는 경향성이 관찰되지 않았다.

수학적 모델들의 통계 분석

앞서 제시한 수학적 모델들에 대해 통계 분석한 결과들을 Table 3에 나타내었고 수학적 모델들을 사용하여 예측된 MR 및 SR 값을 실험값들과 비교한 것을 각각 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었다. 염지 중에 수분 이동 비율을 추정하는 수학적 모델들의 통계 분석결과 R^2 의 경우 0.1436-0.9736, SSE의 경우 0.0019-0.1606, RMSE의 경우 0.0442-0.4007 그리고 χ^2 의 경우 0.0011-0.2060의 범위 값이 계산되었고 NaCl 이동 비율을 추정한 수학적 모델들의 통계 분석 결과 R^2 의 경우 0.9052-0.9974, SSE의 경우 0.0008-0.0431, RMSE의 경우 0.0274-0.2076 그리고 χ^2 의 경우 0.0009-0.0023의 범위 값이 계산되었다. 높은 R^2 값과 낮은 SSE 및 χ^2 값이 관찰되어 오징어 염지공정 동안 발생하는 물질전달 동역학을 가장 잘 예측하는 모델은 수분 성분 이동의 경우 Henderson-Pabis 모델이었고 NaCl 성분 이동의 경우 Page 모델이었다. Lemus-Mondaca et al. (2018)의 연구에서 점보오징어의 고압 함침효과를 예측하는데 수학적

Table 3. Statistical test performed for each mathematical model regarding moisture and solid transfer during immersion

Model	Test	Brine concentration (%)				
		2.5	5	10	15	
Newton	MR	R^2	0.9529	0.9519	0.9058	0.4171
		SSE	0.0045	0.0057	0.0115	0.0129
		RMSE	0.0671	0.0756	0.1073	0.1136
	SR	χ^2	0.0012	0.0012	0.0019	0.0013
		R^2	0.9162	0.9785	0.9052	0.9736
		SSE	0.0431	0.0124	0.0202	0.0111
Henderson Pabis	MR	RMSE	0.2076	0.1113	0.1421	0.1054
		χ^2	0.0014	0.0011	0.0023	0.0014
		R^2	0.9529	0.9515	0.9058	0.4171
	SR	SSE	0.0025	0.0042	0.0128	0.0094
		RMSE	0.0500	0.0650	0.1130	0.0968
		χ^2	0.0012	0.0012	0.0019	0.0013
Page	MR	R^2	0.9162	0.9785	0.9052	0.9736
		SSE	0.0348	0.0024	0.0189	0.0166
		RMSE	0.1866	0.0495	0.1375	0.1288
	SR	χ^2	0.0014	0.0011	0.0023	0.0012
		R^2	0.9736	0.9607	0.8596	0.1436
		SSE	0.0043	0.0058	0.0184	0.0779
Weibull	MR	RMSE	0.0654	0.0761	0.1357	0.2792
		χ^2	0.0013	0.0013	0.0013	0.2060
		R^2	0.9927	0.9955	0.9790	0.9934
	SR	SSE	0.0008	0.0023	0.0152	0.0113
		RMSE	0.0274	0.0480	0.1234	0.1064
		χ^2	0.0014	0.0011	0.0023	0.0012
Weibull	MR	R^2	0.9736	0.9651	0.8981	0.4238
		SSE	0.0637	0.0019	0.0086	0.1606
		RMSE	0.2525	0.0442	0.0927	0.4007
	SR	χ^2	0.0011	0.0011	0.0017	0.0308
		R^2	0.9900	0.9974	0.9777	0.9944
		SSE	0.0014	0.0021	0.0130	0.0065
SR	RMSE	0.0367	0.0460	0.1142	0.0805	
	χ^2	0.0010	0.0010	0.0010	0.0009	

모델을 적용하는 것이 충분히 적합하다고 보고하였고 본 연구에서는 오징어의 염지공정 중 발생하는 물질전달을 예측하는데 수학적 모델을 적용하는 것이 충분히 적합하다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4와 Fig. 5를 도식하여 수학적 모델로 예측된 수분 이동 비율 및 NaCl 이동 비율 값을 실험값과 비교한 결과를 나타내었고 본 연구에서 수분 이동의 경우 Henderson-Pabis 모델 그리고 NaCl 성분 이동의 경우 Page 모델이 적합한 것으로 관찰되었지만 고압 조건이 딸기의 삼투-탈수에 미치는 영향을 수학적 모델로 예측한 결과 Weibull 모델이 적합하다고 보고하였고 (Nuñez-Mancilla et al., 2011) 점보오징어의 삼투-탈수 중에 물질전달 현상을 예측하는데 가장 적합한 모델은 Weibull 및 logarithmic 모델이라고 보고하였다 (Uribe et al., 2011). 또한 점보오징어의

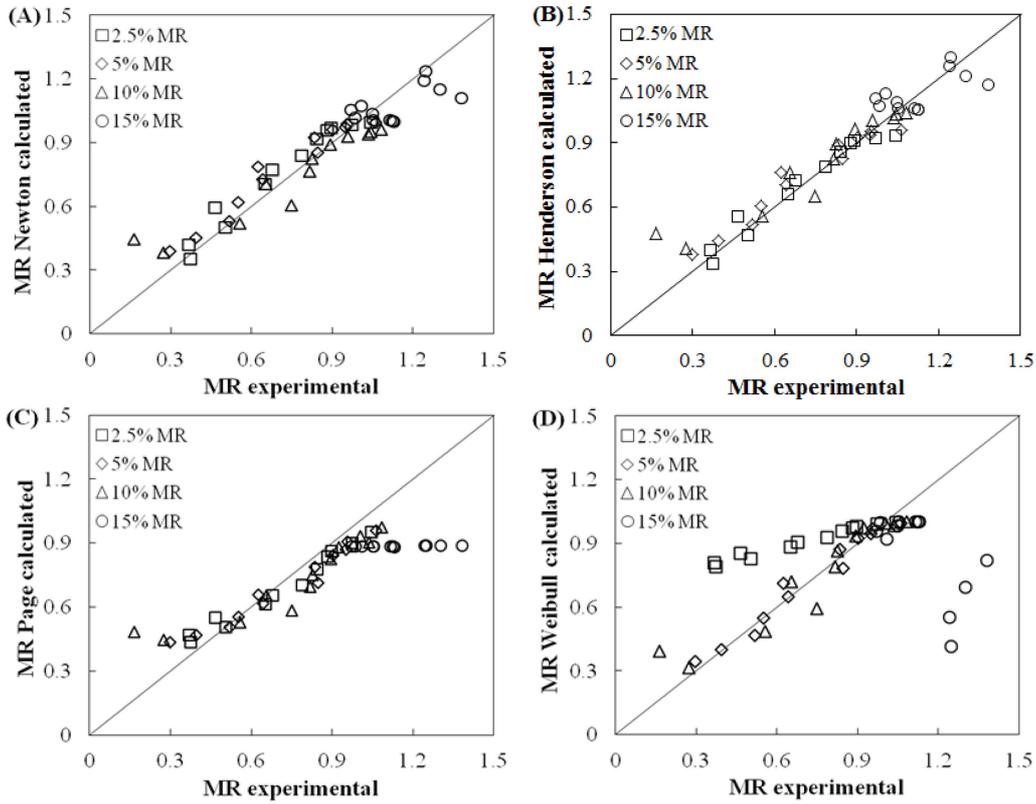


Fig. 4. Comparison between the experimental and estimated values of moisture transfer using immersion. (A) Newton's model; (B) Henderson-Pabis's model; (C) Page's model; (D) Weibull's model.

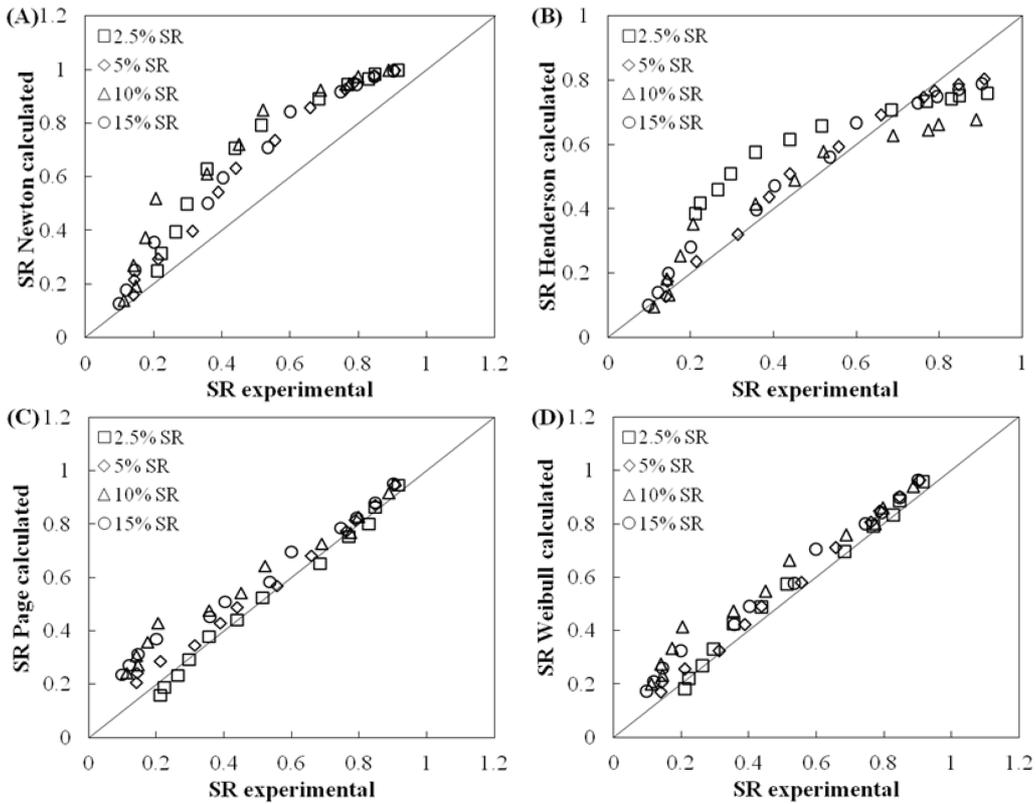


Fig. 5. Comparison between experimental and estimated values for solid transfer using immersion. (A) Newton's model; (B) Henderson-Pabis's model; (C) Page's model; (D) Weibull's model.

Table 4. Texture profile analysis parameters of squid samples using immersion during 360 min

Parameters	Brine concentration (%)				
	Control ¹⁾	2.5	5	10	15
Hardness (N)	41.91 ± 4.36 ^{d2)3)}	13.76 ± 2.53 ^a	22.95 ± 0.51 ^b	26.64 ± 5.22 ^{bc}	31.19 ± 4.28 ^c
Cohesiveness	0.63 ± 0.12 ^a	0.86 ± 0.08 ^b	0.69 ± 0.17 ^{ab}	0.69 ± 0.05 ^{ab}	0.62 ± 0.10 ^a
Springiness (cm)	0.13 ± 0.01 ^b	0.12 ± 0.01 ^{ab}	0.11 ± 0.01 ^a	0.12 ± 0.01 ^{ab}	0.12 ± 0.00 ^b
Chewiness (mJ)	42.65 ± 2.54 ^d	13.57 ± 1.93 ^a	16.67 ± 3.61 ^{ab}	21.47 ± 4.78 ^{bc}	23.14 ± 3.62 ^c

¹⁾ Control represents for raw samples.

²⁾ Different letters in the same line indicate significant differences ($P < 0.05$).

³⁾ Each data was expressed as the mean±SD of three independent experiments.

고압 함침효과를 예측하는데 Weibull 모델이 적합하다고 보고하였다 (Lemus-Mondaca et al., 2018).

염지공정 중에 물성변화

오징어를 NaCl 농도 2.5, 5, 10 및 15% (w/w)로 제조한 염지액에 360분 동안 염지했을 때의 물성 측정 결과를 hardness, cohesiveness, springiness 그리고 chewiness로 Table 4에 나타내었다. Hardness는 시료의 단단함을, cohesiveness는 끈적임을, springiness는 탄력성을 그리고 chewiness는 오징어 근육의 유연성을 나타낸다 (Briones-Labarca et al., 2012). Offer & Trinick (1983)에 의하면 육류 제품 제조 시에 소금을 첨가하면 육류의 팽창(swelling)을 일으키며 이는 첨가한 소금에 의해 삼투압 현상이 발생하여 외부로부터 물의 흡수력을 증대시킨다고 보고되었고 또한 filament의 음이온이 양전하군에 강하게 결합하고 myosin-actin의 상호작용에 의해 M-line 및 Z-line과 같은 근원섬유내의 물리적인 구조 약화를 초래한다고 보고되었고 마찬가지로 Bolumar et al. (2013)의 연구에서 NaCl로 제조한 염지액은 육류를 연화시키고 연결조직을 부드럽게 하여 시료의 조직 구조 변화를 일으키는 성질이 있다고 보고하였다. 따라서, 염지된 오징어 시료의 경우 연화작용이 일어나 대조구보다 낮은 hardness가 측정될 것으로 예측하였다.

물성측정결과 hardness는 13.76-41.91 N의 범위로 2.5% 염지액에서 염지한 오징어 시료가 유의적으로 가장 낮았고 대조구에서 유의적으로 가장 높은 결과 값이 관찰되었으며 염지공정을 진행한 경우 염지액 농도가 높아질수록 hardness가 높아지는 것으로 관찰되었다($p < 0.05$). Cohesiveness는 0.62-0.86의 범위로 2.5% 염지액에서 유의적으로 가장 높았고 15% 염지액에서 염지한 시료와 대조구에서 유의적으로 가장 낮은 결과 값이 관찰되었다($p < 0.05$). Springiness는 대조구에서 유의적으로 가장 높았고 5% 염지액에서 염지한 경우 가장 낮은 결과 값이 관찰되었다($p < 0.05$). Chewiness는 13.57-42.65 mJ의 범위로 2.5% 염지액에서 염지한 오징어 시료가 유의적으로 가장 낮았고 대조구에서 유의적으로 가장 높은 결과 값이 관찰되었으며 염지공정을 진행한 경우 염지액 농도가 높아질수록 chewiness가 높아

지는 것으로 관찰되었다($p < 0.05$).

염지공정을 한 경우 하지 않은 대조구에 비해 유의적으로 낮은 hardness 및 chewiness 값을 관찰할 수 있었고 염지액 농도가 높아질수록 hardness 및 chewiness 값이 높아지는 것으로 나타났으며 2.5%에서 염지한 경우 유의적으로 가장 낮은 값이 관찰되었기 때문에 염지공정이 오징어의 연화에 영향을 미치며 2.5% 농도의 염지액에서 염지시켰을 경우 가장 높은 연화효과를 얻을 수 있는 것으로 판단되었다.

요 약

본 연구는 오징어의 염지공정 동안 발생하는 물질전달을 관찰하고 수학적 모델을 적용하고자 하였다. 수분함량 및 NaCl 함량의 정량적 데이터를 통해 염지의 효과와 물질전달 메커니즘을 이해하고 Fick의 두 번째 법칙을 응용하여 유효확산 계수를 계산하였으며 수학적 모델 4가지를 선택 및 적용하여 실험값과 예측값을 비교해 보았으며, 그 결과로 염지 공정 중에 수분의 이동에 의해 hypertonic과 hypotonic의 역할이 뒤바뀌는, 즉 수화-탈수의 전이가 일어나는 농도를 10-15% 사이로 추론하였다. 염지액의 농도가 높을수록 시료의 수분함량이 낮고 NaCl 함량은 높았으며 2.5% 농도의 염지액에 염지시킨 경우 보수력이 가장 높았다. 또한, 물성 측정 결과 2.5% 농도의 NaCl 수용액으로 염지시켰을 때 연화효과 가장 높은 것으로 관찰되었다. 정량적 데이터를 이용해 유효확산 계수를 계산한 결과 수분 및 NaCl의 유효확산 계수의 범위는 각각 -0.077×10^{-9} 에서 $0.374 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 및 0.549×10^{-9} 에서 $0.841 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 였다. 마지막으로, 수분 및 NaCl 성분 이동에서 각각 Henderson-Pabis 모델 및 Page 모델을 적용했을 때, 예측값과 실험값이 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구가 물질전달 동역학을 예측하는데 수학적 모델을 적용하는 것에 대한 기초연구자료로 사용가능할 것으로 사료되었다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기

확평가원의 고부가가치 식품 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(317031-4).

References

- Akse L, Gundersen B, Lauritzen K, Ofstad R, Solberg T. 1993. Saltfisk: saltmodning, utproving av analysemetoder, misfarget saltfisk. Tromsø: Fiskeriforskning: 1-61
- AOAC. 2000. Official Method of Analysis. Association of Official Analytical Chemists (No. 950.46 and 935.47), Arlington, VA, USA.
- Aregbesola OA., Ogunsina BS, Sofolahan AE, Chime NN. 2015. Mathematical modeling of thin layer drying characteristics of dika (*Irvingia gabonensis*) nuts and kernels. Niger. Food J. 33: 83-89.
- Assis FR, Morais RMSC, Morais AMMB. 2016. Mass transfer in osmotic dehydration of food products: comparison between mathematical models. Food Eng. Rev. 8: 116-133.
- Barat JM, Rodríguez-Barona S, Andrés AA, Fito P. 2002. Influence of increasing brine concentration in the cod-salting process. J. Food Sci. 67: 1922-1925.
- Benjakul S, Visessanguan W, Tanaka M, Ishizaki S, Taluengphol A, Chichanan U. 2000. Physicochemical and textural properties of dried squid as affected by alkaline treatments. J. Sci. Food Agr. 80: 2142-2148.
- Bolumar T, Enneking M, Toepfl S, Heinz V. 2013. New developments in shockwave technology intended for meat tenderization: Opportunities and challenges. A review. Meat Sci. 95(4): 931-939.
- Briones-Labarca V, Perez-Won M, Zamarca M, Aguilera-Radic JM, Tabilo-Munizaga G. 2012. Effects of high hydrostatic pressure on microstructure, texture, colour and biochemical changes of red abalone (*Haliotis rufecens*) during cold storage time. Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 13: 42-50.
- Canto ACVCS, Lima BRCC, Cruz AG, Lázaro CA, Freitas DGC, Faria JAF, Torrezan R, Freitas MQ, Silva TPJ. 2012. Effect of high hydrostatic pressure on the color and texture parameters of refrigerated Caiman (*Caiman crocodilus yacare*) tail meat. Meat Sci. 91(3): 255-260.
- Chiralt A, Fito P. 2003. Transport mechanisms in osmotic dehydration: the role of the structure. Food Sci. Technol. Int. 9: 179-186.
- Collignan A., Bohuon P, Deumier F, Poligné I. 2001. Osmotic treatment of fish and meat products. J. Food Eng. 49: 153-162.
- Corzo O, Bracho N, Pereira A, Vásquez A. 2008. Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. LWT-Food Sci. Technol. 41: 2023-2028.
- Crank J. 1975. The mathematics of diffusion. Ely House: Oxford University Press, London, UK. pp. 24-25
- Deng Y, Luo Y, Wang Y, Yue J, Liu Z, Zhong Y, Zhao Y, Yang H. 2014. Drying-induced protein and microstructure damages of squid fillets affected moisture distribution and rehydration ability during rehydration. J. Food Eng. 123: 23-31.
- Ertekin C, Yaldiz O. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. J. Food Eng. 63: 349-359.
- Gallart-Jornet L, Barat JM, Rustad T, Erikson U, Escriche I, Fito P. 2007. Influence of brine concentration on Atlantic salmon fillet salting. J. Food Eng. 80: 267-275.
- Gou J, Choi GP, Ahn J. 2012. Biochemical quality assessment of semi-dried squid (*Todarodes pacificus*) treated with high hydrostatic pressure. J. Food Biochem. 36: 171-178.
- Gou J, Xu H, Choi GP, Lee HY, Ahn J. 2010. Application of high pressure processing for extending the shelf-life of sliced raw squid. Food Sci. Biotechnol. 19: 923-927.
- Graiver N, Pinotti A, Califano A, Zaritzky N. 2006. Diffusion of sodium chloride in pork tissue. J. Food Eng. 77: 910-918.
- Graiver N, Pinotti A, Califano A, Zaritzky N. 2009. Mathematical modeling of the uptake of curing salts in pork meat. J. Food Eng. 95: 533-540.
- Hongsprabhas P, Barbut S. 1999. Effect of pre-heated whey protein level and salt on texture development of poultry meat batters. Food Res. Int. 32: 145-149.
- Hugas M, Garriga M, Monfort JM. 2002. New mild technologies in meat processing: high pressure as a model technology. Meat Sci. 62: 359-371.
- Khan MAM, Ahrné L, Oliveira JC, Oliveira FAR. 2008. Prediction of water and soluble solids concentration during osmotic dehydration of mango. Food Bioprod. Process. 86: 7-13.
- Knight P, Parsons N. 1988. Action of NaCl and polyphosphates in meat processing: Responses of myofibrils to concentrated salt solutions. Meat Sci. 24: 275-300.
- Lawrence TE, Dikeman ME, Hunt MC, Kastner CL, Johnson DE. 2003. Staged injection marination with calcium lactate, phosphate and salt may improve beef water binding ability and palatability traits. Meat Sci. 65: 967-972.
- Lawrie RA. 2005. Ciencia da Carne, sixteenth ed. Artmed, Porto Alegre, Brazil.
- Le Meste M, Lorient D, Simatos D. 2002. L'eua dans Aliments. Editions Tec and Doc, Paris, France.
- Lemos ALSC, Nunes DRM, Viana AG. 1999. Optimization of the still-marinating process of chicken parts. Meat Sci. 52: 227-234.
- Lemus-Mondaca R, Miranda M, Grau AA, Briones V, Villalobos R, Vega-Gálvez A. 2009. Effect of osmotic pretreatment on hot air drying kinetics and quality of Chilean papaya (*Carica pubescens*). Drying Technol. 27: 1105-1115.
- Lemus-Mondaca R, Zambra C, Marín F, Pérez-Won M, Tabilo-Munizaga G. 2018. Mass transfer kinetic and quality changes during high-pressure impregnation (HPI) of jumbo squid (*Dosidicus gigas*) slices. Food Bioprocess Tech. 11: 1516-1526.
- Mujaffar S, Sankat CK. 2006. The mathematical modelling of the osmotic dehydration of shark fillets at different brine temperatures. Int. J. Food Sci. Technol. 41: 405-416.
- Nguyen MV, Arason S, Thorarinsdottir KA, Thorkelsson G, Gudmundsdóttir A. 2010. Influence of salt concentration on the salting kinetics of cod loin (*Gadus morhua*) during brine salting. J. Food Eng. 100: 225-231.
- Nuñez-Mancilla Y, Perez-Won M, Vega-Gálvez A, Arias V, Tabilo-Munizaga G, Briones-Labarca V, Lemus-Mondaca R, Di-Scala K. 2011. Modeling mass transfer during osmotic dehydration of strawberries under high hydrostatic pressure conditions. Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 12: 338-343.
- Offer G, Trinick J. 1983. On the mechanism of water holding in meat: the swelling and shrinking of myofibrils. Meat Sci. 8: 245-281.
- Ozuna C, Cárcel JA, García-Pérez JV, Peña R, Mulet A. 2015.

- Influence of brine concentration on moisture and NaCl transport during meat salting. In *Water Stress in Biological, Chemical, Pharmaceutical and Food Systems*. Springer, New York, USA, pp. 519-525.
- Paterson BC, Parrish Jr FC, Stromer MH. 1988. Effects of salt and pyrophosphate on the physical and chemical properties of beef muscle. *J. Food Sci.* 53: 1258-1265.
- Pérez-Won M, Lemus-Mondaca R, Tabilo-Munizaga G, Pizarro S, Noma S, Igura N, Shimoda M. 2016. Modelling of red abalone (*Haliotis rufescens*) slices drying process: Effect of osmotic dehydration under high pressure as a pretreatment. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 34: 127-134.
- Rastogi NK., Angersbach A, Knorr D. 2000. Evaluation of mass transfer mechanisms during osmotic treatment of plant materials. *J. Food Sci.* 65: 1016-1019.
- Rastogi NK., Niranjana K. 1998. Enhanced mass transfer during osmotic dehydration of high pressure treated pineapple. *J. Food Sci.* 63: 508-511.
- Rastogi NK., Raghavarao KSMS, Niranjana K, Knorr D. 2002. Recent developments in osmotic dehydration: Methods to enhance mass transfer. *Trends Food Sci. Technol.* 13: 48-59.
- Rastogi NK., Raghavarao KSMS. 2004. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration. *LWT-Food Sci. Technol.* 37: 43-47.
- Ruiz-López II, Castillo-Zamudio RI, Salgado-Cervantes MA, Rodríguez-Jimenes GC, García-Alvarado MA. 2010. Mass transfer modeling during osmotic dehydration of hexahedral pineapple slices in limited volume solutions. *Food Bioprocess Technol.* 3: 427-433.
- Schmidt FC, Carciofi BAM, Laurindo JB. 2008a. Efeito da impregnação a vácuo na transferência de massa durante o processo de salga de cortes de peito de frango. *Food Sci. Technol.* 28: 366-372.
- Schmidt FC, Carciofi BAM, Laurindo JB. 2008b. Salting operational diagrams for chicken breast cuts: hydration-dehydration. *J. Food Eng.* 88: 36-44.
- Schmidt FC, Carciofi BAM, Laurindo JB. 2009. Application of diffusive and empirical models to hydration, dehydration and salt gain during osmotic treatment of chicken breast cuts. *J. Food Eng.* 91: 553-559.
- Sobukola OP, Dairo OU, Odunewu AV. 2008. Convective hot air drying of blanched yam slices. *Int. J. Food Sci. Technol.* 43: 1233-1238.
- Toğrul İT, Pehlivan D. 2003. Modelling of drying kinetics of single apricot. *J. Food Eng.* 58: 23-32.
- Uribe E, Miranda M, Vega-Gálvez A, Quispe I, Clavería R, Di-Scala K. 2011. Mass transfer modelling during osmotic dehydration of jumbo squid (*Dosidicus gigas*): Influence of temperature on diffusion coefficients and kinetic parameters. *Food Bioprocess Technol.* 4: 320-326.
- Vega-Gálvez A, Miranda M, Bilbao-Sáinz C, Uribe E, Lemus-Mondaca R. 2008. Empirical modeling of drying process for apple (cv. Granny Smith) slices at different air temperatures. *J. Food Process. Preserv.* 32: 972-986
- Vega-Gálvez A, Miranda M, Clavería R, Quispe I, Vergara J, Uribe E, Di Scala K. 2011. Effect of air temperature on drying kinetics and quality characteristics of osmo-treated jumbo squid (*Dosidicus gigas*). *LWT-Food Sci. Technol.* 44: 16-23.
- Villacís MF, Rastogi NK., Balasubramaniam VM. 2008. Effect of high pressure on moisture and NaCl diffusion into turkey breast. *LWT-Food Sci. Technol.* 41: 836-844.

Author Information

- 이낙훈: 차의과학대학교 식품생명공학과 석사
 박민: 차의과학대학교 식품생명공학과 석사
 박진홍: 차의과학대학교 일반대학원 연구원
 인예원: 차의과학대학교 일반대학원 연구원
 오상엽: 서울대학교 전기정보공학부 박사
 조형용: 차의과학대학교 식품생명공학과 부교수