

명태 유통 중 *Pseudomonas* spp. 농도의 예측 모델링과 민감도 분석

심수동·성재웅¹·이중용·이다선¹·김선봉¹·홍광원·이양봉¹·이승주*

동국대학교 식품공학과, ¹부경대학교 식품공학과

Dynamic Modeling and Sensitivity Analysis for Predicting the *Pseudomonas* spp. Concentration in Alaska Pollack along the Distribution Path

Soo Dong Shim, Jae Ung Sung¹, Jung Young Lee,
Da Sun Lee¹, Seon Bong Kim¹, Kwang Won Hong,
Yang Bong Lee¹ and Seung Ju Lee*

Department of Food Science and Technology, Dongguk University,
Seoul 100-715, Korea

¹Department of Food Science and Technology, Pukyong National University,
Busan 608-737, Korea

Dynamic modeling was used to predict the *Pseudomonas* spp. concentration in Alaska pollack under dynamic temperature conditions in a programmable incubator using Euler's method. The model evaluation showed good agreement between the predicted and measured concentrations of *Pseudomonas* spp. In the simulation, three kinds of distribution path were assumed: consumers buying from a distribution center (A), manufacturer (B), or direct market (C). Each of these distribution paths consists of six phases: shipping, warehousing/shipment, warehousing/storing, processing, market exhibition, and sale/consumption. Sensitivity analysis of each phase was also implemented. The *Pseudomonas* concentrations and sensitivities (S_k) at the terminal phases of the three paths were estimated to be (A) 11.174 log CFU/g and 10.550 log S_k , (B) 10.948 log CFU/g and 10.738 log S_k , and (C) 8.758 log CFU/g and 9.602 log S_k , respectively. The sensitivities indicated that path A has the highest risk of failure in managing the relevant phases.

Key words: Dynamic kinetic modeling, Sensitivity analysis, Alaska pollack, *Pseudomonas*, Simulation

서 론

명태 (Alaska pollack, *Theragra chalcogramma*)는 한국의 동해안으로부터 북미 해안, 북태평양, 오호츠크해, 베링해 등 여러 해역에 넓게 분포하는 한류성 어종으로 (Tsuzi, 1978), 미국의 경우에는 1990-1997 수산식품 소비량 중 3위로 나타날 정도로 그 소비량이 많은 어종으로 알려져 있다 (Lehrer et al., 2003). 이에 따라 유통저장 중 품질의 유지 및 위생관리가 더욱 중요하다 할 수 있다. 최근의 수산물 유통환경은 유통기관의 다양화와 고품질의 안전수산물에 대한 소비자들의 요구가 높아지면서 새로운 변화의 기점에 들어서 있다 (Kim, 2004). 그런데 이런 유통환경 변화에 따른 실제 수산물 식품의 품질분석과 연관시킨 연구는 제한적으로 이뤄졌다 (Pak et al., 2006). 따라서 실제 유통조건에 따른 수산물 식품의 품질분석이 필요하다.

수산물 유통경로는 매우 복잡하고 생산량의 불확실성이 존재하기 때문에 품질관리에 어려움이 있다. 품질지수의 체계적인 분석을 위한 kinetic modelling을 통해 유통의 효율성을 제고할 수 있다. Kinetic modelling중에서도 특정 온도에서 측

정한 steady modelling (Vaz-Pires et al., 2008)뿐 아니라 연속적인 온도변화에서 측정된 dynamic modelling (Koutsoumanis, 2001)을 실시해야 한다.

수산물 유통과 품질분석에 관한 연구는 다음과 같이 수행된 바 있다. 진공으로 포장된 냉장 참치의 유통기한의 최적화를 위한 TTI (time temperature integrator)에 기반한 SMAS (Safety Monitoring and Assurance System)의 적용과 검증에 관한 연구가 유통시스템관리기법의 관점에서 이루어졌다 (Tsironi et al., 2008). 또한 냉장유통에서 생선품질의 모니터링을 위한 TTI 적용의 현장평가에 관한 연구에서는 실제 유통현장에 대한 simulation이 수행된 바 있다 (Giannakourou et al., 2005). 한편, dynamic 저장조건에서 냉장생선 및 냉동새우의 유통기한 조절을 위한 TTI의 사용과 예측모델링의 결과가 보고되었다 (Taoukis, 1999; Tsironi, 2009).

식품의 품질변화 kinetic modelling을 위해서는 시간에 따른 변화율을 포함하는 미분방정식으로 계산을 해야 한다. 이 수식을 풀이하는 방법에는 공식해법 (analytical solution)과 수치해석법 (numerical analysis)을 적용할 수 있다 (Geankoplis, 1983). 공식해법을 적용시킨 연구로는 식품건조 kinetics

*Corresponding author: Lseungju@dongguk.edu

modelling을 위한 수축을 고려한 물질전달함수식 (Hernández et al., 2000), 수축과 변이 확산도를 고려한 식품건조 kinetic 함수식 (Ruiz-López and García-Alvarado, 2007), TTI의 색변화와 식품품질과의 상관 함수식 (Giannakourou et al., 2005) 등이 있다. 그러나 공식해법은 미적분과 관련하여 그 풀이에 난해함 및 한계가 있으므로 이에 대하여 수치해석법을 사용할 수 있다. 시간과 온도에 따라 변하는 dynamic 조건도 이에 속하는 경우로서 수치해석을 적용해야 한다. 수치해석법을 이용한 연구로서 탈지분유의 트레이 및 바이얼 내에서의 진공 동결건조의 수리적 분석 (Song et al., 2001), 식품건조공정의 수분확산도를 평가하기 위한 방법의 개발 (Vongchanh et al., 2009), 육류의 dynamic 저장 조건에서 품질과 TTI 색 변화의 예측 (Park et al., 2009) 등의 사례가 있다.

실제 유통경로에서 식품의 부패와 연관된 품질인자는 환경에 노출되는 온도와 시간에 따라 그 민감도 (sensitivity)가 다르다. 유통경로는 원료의 획득부터, 입고, 출하, 저장, 가공, 진열, 판매, 소비 등 다양한 단계가 존재한다 (Pak et al., 2006). 따라서 각 유통단계에 노출되는 온도와 시간을 고려한 민감도 분석을 실시해야 한다. 민감도 분석은 특정모형에서의 투입 (input)과 산출 (output) 사이의 정보흐름에 관한 분석을 의미한다 (Jun, 2007). 즉, 특정변수가 종속변수에 영향을 미치는지에 대한 정성적 분석과 어떠한 변수가 보다 큰 영향을 주는지에 대한 정량적 분석을 모두 포함한다. 민감도 분석에 관한 연구로서 시뮬레이션 모델을 이용한 토양기반 해충제의 미생물분해 (China et al., 2004), 단백질 분해성의 *Clostridium botulinum*을 위한 성장 모델의 시간 (Whiting and Call, 1993) 등이 있다. 또한 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 한식메뉴 중 비가열 처리 식품의 정량적 위해평가에 민감도분석을 적용한 바 있다 (Lee and Park, 2008).

본 연구에서는 명태 (Alaska pollack)의 일반적 유통경로의 온도-시간 이력 하에서 *Pseudomonas* spp.의 성장을 modelling 하였다. 여기서 선어류 부패의 품질지표로서 많이 사용된 *Pseudomonas* spp. (Feldhusen, 2000)를 dynamic 조건에 대한 성장을 예측하기 위하여 수치해석법인 Euler's method를 적용하였다. 유통경로는 대형판매장, 가공업자, 직접거래를 통한 구매의 3가지 경우로 구분하여 온도-시간 조건을 설정하였다. 그리고 각 유통경로에 따라 발생된 *Pseudomonas* spp.농도 예측값의 민감도분석을 실시하여 명태류의 유통 중 품질관리에 적용할 수 있도록 제시했다.

재료 및 방법

재료

본 연구에서는 일본 북해도에서 어획한 명태를 시료로 사용하였다. 어획한 후 최대 9일 이내의 선어상태의 명태를 whole fish 형태로 대형마트 (롯데마트, 서울역 mall에 소재)에서 구매하였다. 실험실까지 약 1°C 전후의 온도를 유지한 채로 약 1시간동안 이동하였다. 시료는 개체의 길이가 평균 44.34 (± 0.46) cm, 무게가 평균 451.31 (± 5.72) g인 명태를 사용하였다.

Dynamic 저장 실험

시료는 3마리씩 whole fish 형태로 비닐팩 포장하여 보관하였다. 시간-온도 스케줄 조건은 5°C에서 12시간, 15°C에서 24시간, 20°C에서 24시간, 10°C에서 24시간, 5°C에서 36시간으로 설정하여 thermo recorder (TR-51S, Japan)와 같이 programmable incubator (HST-103SP, Hanbaek Co., Seoul, Korea)에 보관하여 *Pseudomonas* spp. 측정에 한 마리씩 꺼내어 사용하였다.

Pseudomonas spp. 측정

시료를 잘게 갈은 후, 5 g을 취하여 50 mL 용량의 conical tube (BD Falcon 352070, BD Co., Texarkana, USA)에 담는다. 멸균된 희석액 buffered peptone water (buffered peptone water 20 g/L, pH 7.2)를 20 mL 넣고 vortex mixer (VM-10, Wise Mix Co., Seoul, Korea)를 사용하여 1분간 균일하게 혼합한 후, buffered peptone water 25 mL을 첨가하였다. 검액은 buffered peptone water를 사용하여 십진희석하여 알맞은 희석 배수로 만들었다. 적정량의 검액을 미리 petri dish (SPL 10090, SPL Co., Seoul, Korea)에 굳혀 놓은 배지에 도말 한 후, 항온기 (HST-103SP, Hanbaek, Seoul, Korea)를 사용하여 30°C에서 48시간 배양하였다. 배지는 *Pseudomonas* agar base (CM-0559, OXOID Ltd., Basingstoke, England)와 glycerol supplement (MB-G1821, Kisan Bio Korea Co., Seoul, Korea)를 혼합하여 멸균한 *Pseudomonas* 선택배지에 2 mL의 cephalosporin fucidin cetrinide supplement (MB-C1849, Kisan Bio Korea Co., Seoul, Korea)를 첨가한 후 굳혔다. 3회 반복하여 실험을 진행하였고, 집락수는 시료 g당 colony forming unit (CFU)로 구하였다.

Growth model

Primary model 중 exponential model을 *Pseudomonas* spp. 예측값 계산에 적용하였다 (Taoukis et al., 1999).

$$N = N_0 \cdot \exp(k \cdot t) \quad (1)$$

$$\frac{d[\ln(N/N_0)]}{dt} = k \quad (2)$$

여기서 N은 t일 때 미생물개체수 (CFU/g), N_0 는 초기상태의 미생물개체수 (CFU/g), k는 미생물성장속도 (1/h), t는 시간 (h)이다. 식 (2)는 식 (1)의 미생물개체수비 $\ln(N/N_0)$ 를 t에 대한 변화율로 나타낸 것이다.

미생물성장속도 k는 온도의존성식인 다음의 Arrhenius model로 구하였다.

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \quad (3)$$

여기서 k_0 는 frequency factor (1/h) 이고, E_a 는 활성화에너지

(J/mol), R은 이상기체상수 (8.314×10^{-3} kJ/mol·K), T는 절대온도 (K)이다. 단, k_0 ($= 4.928 \times 10^7$ 1/h)와 E_a ($= 49.578$ J/mol·K) 값은 같은 명태시료를 사용한 전보의 결과를 활용하였다 (Shim et al., 2010). 식 (2)의 $\ln(N/N_0)$ 를 시간에 따라 계산하기 위해서 적분을 해야 하는데, $\ln(N/N_0)$ 값은 시간-온도에 따라 일정치 않기 때문에 공식해법으로 접근할 수 없다. 따라서 다음과 같이 수치해석법을 적용하였다.

수치해석

수치해석법으로 Euler's method를 적용하였다 (Macdonald et al., 2008; Park et al., 2009).

$$\ln(N/N_0)_{t+1} = \ln(N/N_0)_t + \left(\frac{d[\ln(N/N_0)]}{dt} \right)_t \cdot \Delta t \quad (4)$$

여기서 i 는 임의저장 경과시점 ($t = \Delta t \cdot i$)을 나타낸다. 식 (3)에 $\ln(N/N_0)$ 의 변화율을 식 (2)로부터 적용하면 다음과 같이 변형된다.

$$\left(\frac{d[\ln(N/N_0)]}{dt} \right)_t = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T_i}\right) \quad (5)$$

결과적으로 식 (4)와 식 (5)를 연동하여 t에 따른 $\ln(N/N_0)$ 를 계산하였다.

민감도 분석

예측한 *Pseudomonas* spp. 개체수의 민감도 (S_k , sensitivity)를 다음과 같이 계산하였다.

$$S_k = \frac{\partial(N)}{\partial k} = N_0 \cdot t \cdot \exp(k \cdot t) \quad (6)$$

식 (1)의 N값을 k에 대해 편미분하면 식 (6)과 같은 식을 얻을 수 있다 (Van Boekel, 2009). 수치해석과 연동하여 민감도 S_k 를 계산하였고 증식한 *Pseudomonas* spp.의 개체수와 비교했다.

컴퓨터 프로그래밍

수치해석 연산과 민감도 분석 모두 육류 품질의 simulation에 성공적으로 적용한 바 있는 알고리즘을 활용하였다 (Park et al., 2009). MS Excel 2007의 visual basic program (VBA)을 개발도구로 사용하여 연산하였다. t에 따른 N값을 연산하여 MS Excel 2007의 spreadsheet 및 graph로 직접 나타냈다.

유통경로의 설정

기존 자료를 참고하여 대표적인 유통경로를 설정하였다 (Pak et al., 2006). 유통경로의 시간-온도 조건에 대하여 상기의 dynamic modelling을 적용하여 유통경로 상 *Pseudomonas* spp. 증식도를 simulation하고 민감도를 분석하였다.

결과 및 고찰

Pseudomonas spp.의 증식도 dynamic modelling

Dynamic 저장실험 결과 측정된 *Pseudomonas* 증식곡선과 예측 모델과의 비교를 Fig. 1에 나타냈다. 초기 온도는 5°C, 균수는 3.306 log CFU/g 이고, 12시간 동안 완만한 증식을 보였다. 12시간 이후부터 온도를 15°C로 승온시켜 12시간 동안 실험한 결과 6.826 log CFU/g의 균수 증식을 보였다. 36시간 이후부터 온도를 20°C로 승온시켜 24시간 동안 실험한 결과 7.409 log CFU/g의 균수 증식을 보였고, 60시간 이후 10°C로 24시간 동안 실험한 결과 8.608 log CFU/g의 균수가 측정되었다. 84시간 이후 최종적으로 5°C에서 24시간 증식한 결과 균수는 8.681 log CFU/g 이 나왔다. 약 36시간과 48시간 사이에 명태의 균수가 7 log CFU/g을 넘어섰다. 다른 연구에서 7 log CFU/g을 넘어설 경우에 부패시작이라 여긴 것으로 보아 이 시간 범위에서 명태의 부패가 일어남을 알 수 있었다 (Stamatis and Arkoudelos, 2007).

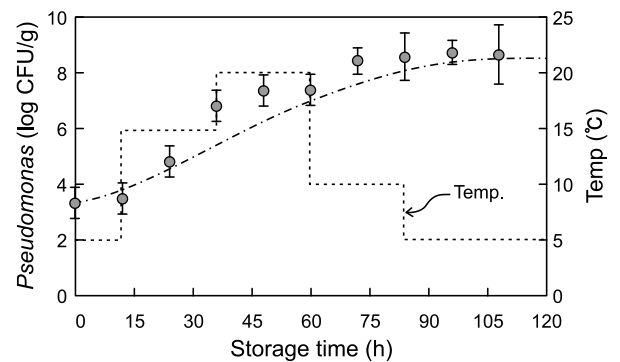


Fig. 1. Comparison between predicted and measured *Pseudomonas* concentration with respect to a temperature profile. ●: measured model, —: predicted model,: temp profile.

예측 모델로부터 균수의 계산에는 실제 저장실험과 같은 농도인 3.306 log CFU/g을 초기 균수로 설정하여 적용하였다. 측정값과 비교한 결과, Fig. 1에서 초기에는 계산값이 더 작게 나왔으나, 후기에 갈수록 그 차이가 감소하였다. 실험값의 편차 범위에 대부분 들어가 예측 모델은 의미가 있다고 판단하여 다음과 같이 유통경로에 따른 미생물 농도를 simulation 하는데 적용하였다.

유통경로의 설정

명태는 주로 일본 북해도 근해 어장에서 획득한 경우가 많아서 실제 항구입고까지 시간이 걸린다. 그래서 유통단계의 초기경로를 배에서부터 시작하여 소비자가 구매하는 시점까지를 최종경로로 가정하였다. 전체경로에서 나올 수 있는 단계는 총 6단계이고 전체시간은 143시간이다. 1단계는 배에서 1°C, 72시간, 2단계는 입고/출하 0°C, 15시간, 3단계는 입고/저

장 -5°C, 8시간, 4단계는 가공 5°C, 24시간, 5단계는 매장진열 5°C, 12시간, 6단계는 판매/구매 25°C, 12시간으로 정하였다. 전체경로에서 빈번한 3가지 경로를 설정하여 미생물 성장 예측과 민감도 분석에 사용하였다. 유통업체를 통한 구매 (A, buying from distribution center)는 배, 입고/출하, 입고/저장, 매장진열, 판매/구매 이렇게 5단계를 거친다. 또 가공업체를 통한 구매 (B, buying from manufacturer)는 배, 입고/출하, 가공, 판매/구매 4단계를 거치며, 직거래 (C, buying from direct market)는 배, 입고/출하, 판매/구매 3단계를 거친다 (Pak et al., 2006). Fig. 2에 유통경로에 따른 노출온도를 각 단계별로 나타냈다.

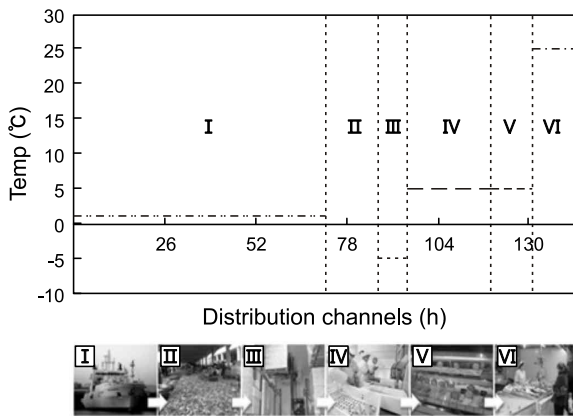


Fig. 2. Distribution channels and the typical temperatures at each phase of Alaska pollack from shipping to sale/consumption. I: shipping, II: warehousing/shipment, III: warehousing/storing, IV: processing, V: market exhibition, VI: sale/consumption.

Pseudomonas 성장 예측모델과 민감도 분석

유통경로 (A), (B), (C)에 따른 *Pseudomonas*의 성장 예측모델은 수치해석으로 예측하여 Fig. 3-A, Fig. 4-A, Fig. 5-A 에 나타냈다. Fig. 1과 다른 형태의 곡선을 확인할 수 있는데 곡선의 끝으로 갈수록 증가하는 양상을 보인다. 온도 profile이 좁은 구간에서 크게 변화할 때 곡선의 기울기가 증가한다. 유통경로 (A), (B), (C) 모두 최종 단계에서 온도가 급격히 높아지는데 판매/구매 단계일 때 상온에 노출되기 때문이다. 이 단계에서 *Pseudomonas*의 개체수도 급격히 증가하며 유통경로 (A), (B)의 경우 부패수준을 뛰어넘는 개체수를 보였다. 또한 유통경로의 총 시간이 길수록 *Pseudomonas*의 개체수도 증가하였다. 유통경로 (B)는 총 123시간에 노출되어 있어 제일 많은 개체수 증가를 보였다. 유통경로를 각 단계별로 고려할 때, 첫번째 단계는 배에 있을 경우인데 노출시간이 72시간으로 제일 길지만 온도가 1°C에 노출되어 있어 개체수 증가가 크지 않았다. 두번째 단계인 입고/출하의 경우 0°C에 노출되어 기울기가 약간 감소함을 보였다. 유통경로 (A)의 세번째 단계는 입고/저장 인데 주로 냉동보관을 하므로 -5°C에 노출되어 있어 기울기가 입고/출하일 때보다 더 감소하였다. 유통경로

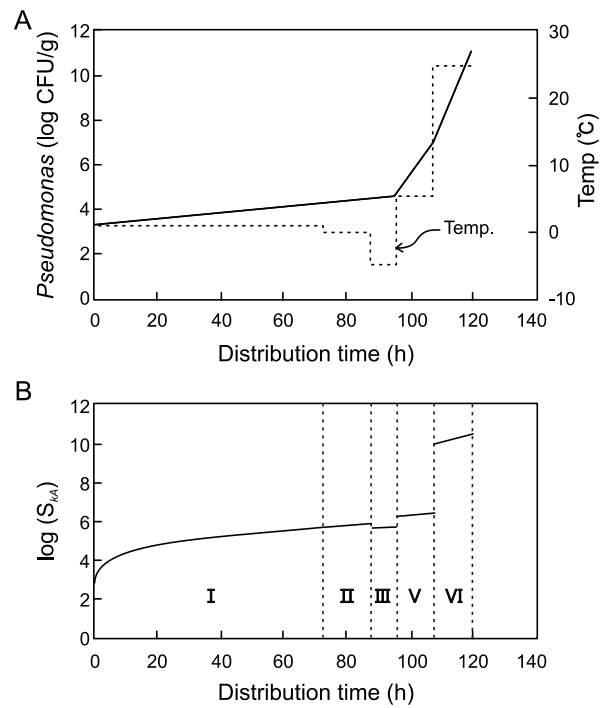


Fig. 3. Sensitivity and predicted level of *Pseudomonas* spp. during distribution in case of buying from distribution center (A).

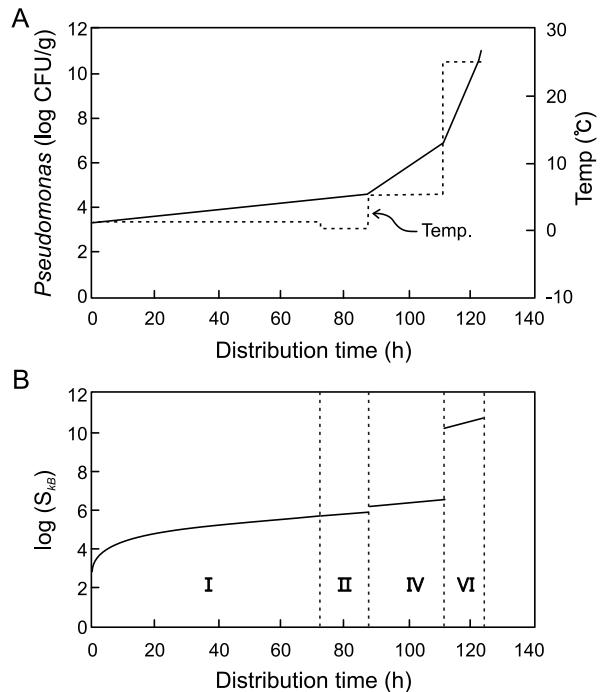


Fig. 4. Sensitivity and predicted level of *Pseudomonas* spp. during distribution in case of buying from manufacturer (B).

(B)의 세번째 단계인 가공공정에서는 노출시간이 24시간으로 이전 단계보다 길고 온도도 5°C로 약간 높아져 다시 기울기가

증가하는 양상을 보였다. 유통경로 (A)의 네번째 단계인 매장 진열의 경우도 12시간을 넘지 않았지만 기온기가 이전 단계보다 증가하였다. 최종 simulation된 *Pseudomonas*의 농도는 유통경로 (A)는 11.174 log CFU/g, (B)는 10.948 log CFU/g, (C)는 8.758 log CFU/g로 산출되었다. Table 1에 유통경로유형에 따른 유통 각 단계의 시간과 최종단계인 판매/구매일 때의 *Pseudomonas* 농도를 나타냈다.

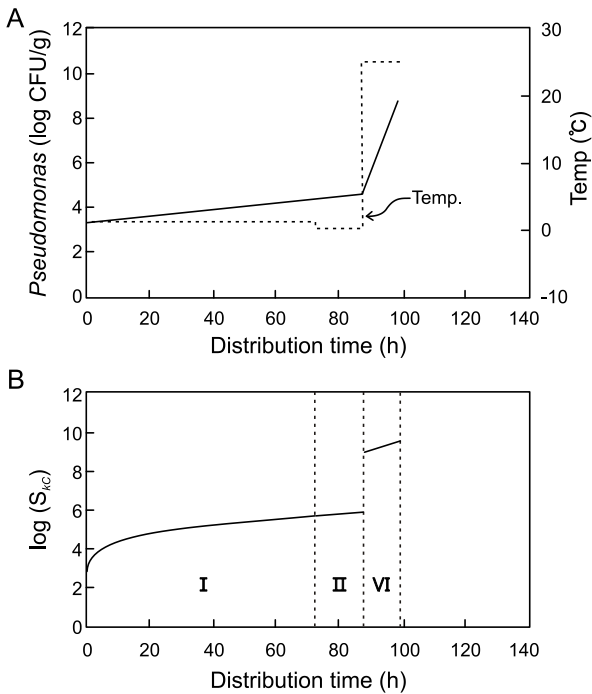


Fig. 5. Sensitivity and predicted level of *Pseudomonas* spp. during distribution in case of buying from direct marketing (C).

Table 1. Residence times at each of distribution phases according to distribution channel types and *Pseudomonas* concentration at the final phase-sale/consumption

Distribution channel type	Shipping (h)	Warehousing/shipment (h)	Warehousing/Sorting (h)	Processing (h)	Market exhibition (h)	Sale/Consumption (h)	<i>Pseudomonas</i> (log CFU/g)
Buying from distribution center (A)	72	15	8	0	12	12	11.174
Buying from manufacturer (B)	72	15	0	24	0	12	10.948

민감도 (sensitivity) 분석의 경우 식 (6)으로 수치해석한 도표를 Fig. 3-B, Fig. 4-B, Fig. 5-B 하단부에 나타냈다. 초기균수는 3.306 log CFU/g로 설정하여 simulation한 도표는 유통경로의 각 단계별로 다르게 나타났다. 민감도인 S_k 값은 너무 커서 log처리를 했다. 각 단계별 시작농도가 조금씩 다른데 이것은 누적된 농도가 아닌 그 단계에서 발생할 수 있는 민감도를 나타내는 것이기 때문이다. 기온기 양상을 보고 민

감도 수준을 판단할 수 있다. 온도 profile의 증가폭이 적으면 민감도의 기온기도 감소하고 노출된 유통시간의 크기에 따라 최종농도도 달라지는 것을 확인하였다. 한편 유통시간이 짧은 경우는 초기 증가 값이 너무 커서 도표 상에서도 보이질 않을 정도의 기온기를 보였다. 최종 simulation된 민감도는 유통경로 (A)는 10.550 log S_k , (B)는 10.738 log S_k , (C)는 9.602 log S_k 로 산출되었다. Table 2에 유통경로 유형에 따른 각 단계별 민감도 수준을 나타냈다.

Table 2. Sensitivity at each of distribution phases according to distribution channel types

Distribution channel type	Shipping (log S_k)	Warehousing/ Shipment (log S_k)	Warehousing/Sorting (log S_k)	Processing (log S_k)	Market exhibition (log S_k)	Sale/Consumption (log S_k)
Buying from distribution center (A)	5.708	5.854	5.726	0	6.442	10.550
Buying from manufacturer (B)	5.708	5.854	0	6.499	0	10.738
Buying from Direct marketing (C)	5.708	5.854	0	0	0	9.602

각각 simulation된 *Pseudomonas* 농도와 민감도 값을 활용하여 유통단계에 따라 발생될 수 있는 위해도를 정량적으로 예측할 수 있었다. 결과적으로 경로 (A)가 가장 높은 위해수준을 보였다. 유통경로에 노출된 시간과 온도에 따라 발생될 수 있는 위해도는 다양한 결과를 나타내므로 예측 시 어려움을 가질 수 있다. 그리고 명태를 비롯한 다른 선어들의 품질관리에 여러 미생물을 지표로서 설정할 수 있는데, 본 연구에서는 *Pseudomonas*를 품질지표로 한정하였다. 그 이유는 수산물 유통과정을 대변하기 위해서 보다 명확한 기준이 필요했기 때문에 가장 빈번한 발생률을 보이는 미생물을 고려했다. 따라서 명태류의 유통조건에 따른 품질관리를 위해 본 연구에서 제안한 dynamic modelling과 민감도 분석을 한 방법을 따른다면 발생할 수 있는 *Pseudomonas* 농도를 보다 정량적으로 예측할 수 있으리라 생각된다.

사 사

본 연구는 한국해양수산기술진흥원에서 주관하는 해양과학기술연구개발사업의 일부로 이루어진 바, 이에 감사드립니다.

참고문헌

China M, Shashi and Kumar S. 2004. Sensitivity analysis of biodegradation of soil applied pesticides using a simulation model. *Biochem Eng J* 19, 119-125.
 Feldhusen F. 2000. The role of seafood in bacterial foodborne diseases. *Microbes and Infection* 2, 1651-1660.

- Geankoplis CJ. 1983. Transport processes and unit operations, Second Edition. Allyn and Bacon, Inc., London, U.K., 29-33.
- Giannakouroua MC, Koutsoumanisb K, Nychas GJE and Taoukis PS. 2005. Field evaluation of the application of time temperature integrators for monitoring fish quality in the chill chain. *Inter J Food Microbio* 102, 323-336.
- Hernández JA, Pavón G and García MA. 2000. Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modeling food-drying kinetics. *J Food Eng* 45, 1-10.
- Jun CY. 2007. Sensitivity analysis on variation factor of export and import in container shipment. *Maritime* 276, 21-44.
- Kim JB. 2004. Introduction of RFID-based fisheries traceability. *Ocean Policy Research* 19, 77-105.
- Koutsoumanis K. 2001. Predictive modeling of the shelf life of fish under nonisothermal conditions. *App Environ Microbio* 67, 1821-1829.
- Lee SJ and Park A. 2008. Quantitative risk assessment of Korean style menu items: A case study on the exposure assessment of Saengchae (a Korean radish salad). *Jpn J Food Eng* 9, 9-20.
- Macdonald CB, Gottlieb S and Ruuth SJ. 2008. A numerical study of diagonally split Runge-Kutta methods for PDEs with discontinuities. *J Sci Comput* 35, 89-112.
- Pak MS, Kim JU, Lee WJ and Park SC. 2006. A study on restructuring of the marine products value chain and the development of e-commerce trading systems in the ubiquitous environment. *J Korea IT Servi* 5, 125-136.
- Park HJ, Shim SD, Min SG and Lee SJ. 2009. Mathematical simulation of the temperature dependence of time temperature integrator (TTI) and meat qualities. *Korean J Food Sci Ani Resour* 29, 349-355.
- Ruiz-López II and García-Alvarado MA. 2007. Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity. *J Food Eng* 79, 208-216.
- Shim SD, Kim DW, An SR, Lee DS, Kim SB, Hong KW, Lee YB and Lee SJ. 2010. Using modeling to predict Alaska pollack quality during storage. *Kor J Fish Aquat Sci* (submitted).
- Song CS, Nam JH, Kim CJ and Ro ST. 2001. A numerical analysis of vacuum freeze drying process of skim milk in a tray and in vials. *Food Eng Prog* 5, 103-114.
- Stamatis N and Arkoudelos J. 2007. Quality assessment of *Scomber colias japonicus* under modified atmosphere and vacuum packaging. *Food Control* 18, 292-300.
- Taoukis PS, Koutsoumanis K and Nychas GJE. 1999. Use of time-temperature integrators and predictive modelling for shelf life control of chilled fish under dynamic storage conditions. *Int J Food Microbio* 53, 21-31.
- Tsironi T, Dermesonlouoglou E, Giannakourou M and Taoukis P. 2009. Shelf life modelling of frozen shrimp at variable temperature conditions. *LWT-Food Sci Technol* 42, 664-671.
- Tsironi T, Gogou E, Velliou E and Taoukis PS. 2008. Application and validation of the TTI based chill chain management system SMAS (Safety Monitoring and Assurance System) on shelf life optimization of vacuum packed chilled tuna. *Int J Food Microbio* 128, 108-115.
- Van Boekel Martinus AJS. 2009. Kinetic modeling of reactions in foods. CRC Press, U.S.A., 774-776.
- Vaz-Pires P, Seixas P, Mota M, Lapa-Guimarães J, Pickova J, Lindo A and Silva, T. 2008. Sensory, microbiological, physical and chemical properties of cuttlefish (*Sepia officinalis*) and broadtail shortfin squid (*Illex coindetii*) stored in ice. *LWT-Food Sci Technol* 41, 1655-1664.
- Vongchanh K, Kudo K, Konishi Y, Ariyadi S and Halim A. 2009. Development of a method to estimate moisture diffusivity as a function of local moisture content for the numerical simulation of food drying process. *J Thermal Sci Technol* 4, 1-12.
- Whiting RC and Call JE. 1993. Time of growth model for proteolytic *Clostridium botulinum*. *Food microbiology* 10, 295-301.

2009년 10월 16일 접수
2010년 4월 26일 수정
2010년 6월 6일 수리