

육류의 품질과 Time Temperature Integrator(TTI) 온도의존성에 대한 수학적 Simulation

박한조 · 심수동 · 민상기¹ · 이승주*

동국대학교 식품공학과, ¹건국대학교 축산식품생물공학전공

Mathematical Simulation of the Temperature Dependence of Time Temperature Integrator (TTI) and Meat Qualities

Han Jo Park, Soo Dong Shim, Sang-Gi Min¹, and Seung Ju Lee*

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

¹Department of Food Science and Biotechnology of Animal Resources, Konguk University, Seoul 143-701, Korea

Abstract

The temperature dependence of time temperature integrator (TTI) was investigated in terms of the Arrhenius activation energy (E_a) to determine TTI requirements to accurately predict meat quality during storage. Mathematical simulation was conducted using a numerical analysis. First, using Euler's method and MS Excel VBA, the TTI color change was kinetically modeled and numerically calculated under several storage conditions. From the TTI color variable profiles calculated from the storage time-temperature profiles, T_{eff} , which is a constant temperature representing the whole temperature profiles, was calculated. Upon predicting *Pseudomonas* spp. concentrations (one of the meat qualities) from T_{eff} , it was found that if $E_{a_{microbial\ spoilage}} = E_{a_{TTI}}$ be true, then *Pseudomonas* concentrations were calculated to be constant with the same TTI color values, regardless of time-temperature profiles, whereas if $E_{a_{microbial\ spoilage}} \neq E_{a_{TTI}}$, then *Pseudomonas* concentrations varied even with the same TTI color values. This indicates that each TTI color value represents its own fixed degree of meat quality, only if $E_{a_{meat\ qualities}} = E_{a_{TTI}}$.

Key words: time temperature integrator, temperature dependence, activation energy, mathematical simulation

서 론

사회 여건의 변화, 식품의 다양화, 고급화 및 간편화의 영향으로 안전하고 편리한 식품공급체계에 대한 관심이 높아지고 있다(Hathaway, 1999). 기존의 양적인 소비 패턴보다 품질 및 안전성을 인식하며 고품질의 제품을 선호하는 경향이 대두되고 있다. 이에 대한 경쟁력을 강화하기 위하여 육류유통 중의 품질변화를 최소화하여야 한다(Jung *et al.*, 2008). 또한, 식품의 품질에 대한 욕구가 높아 짐에 따라 과학적인 품질변화 예측의 필요성이 요구되는 추세이며, 경제적인 비용으로 품질변화의 예측을 위한 연구로 어패류, 과일 및 채소류, 육류, 유제품 등 다양한 식품의 유통에 time temperature integrator(TTI)의 적용이 보고된

바 있다(Bin *et al.*, 1991).

TTI는 저장 및 운반 중 식품이 경험한 시간-온도에 대한 이력을 정량적으로 나타내는 센서이다. 일반적인 TTI는 시간-온도 이력에 의한 색의 변화를 통하여 동반된 식품의 품질을 예측하는데 사용되며(Lee and Lee, 2008), 변하기 쉬운 식품의 시간-온도 이력을 모니터 하는데 간단함과 비용효과를 제공하는 장점이 있다(Mendoza *et al.*, 2004). 현재 확산형, 효소형, 고분자형의 3종의 제품이 개발된 바 있다. 주로 연구에 사용된 TTI는 효소형 타입으로 효소에 의한 지질의 가수분해에 의해 pH가 저하하며, pH의 변화에 의해 지시계의 색이 변화된다. 이 TTI는 두 공간으로 구분되어 있는데 한곳에는 지질분해 효소수용액, 다른 한편에는 pH 지시계와 함께 지질수용액이 포함되어 있다. 사용목적에 따라 다양한 종류의 효소 및 기질이 사용될 수 있으며, 두 공간을 나누고 있는 막의 파괴에 의해 TTI의 활성화가 시작된다(Giannakourou *et al.*, 2005).

TTI의 적용 사례로는 “냉동채소의 품질조절을 위한 도

*Corresponding author : Seung Ju Lee, Department of Food Science and Technology, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea. Tel: 82-2-2260-3372, Fax: 82-2-2260-3372, E-mail: Lseungju@dongguk.edu

구로서 TTI의 체계적인 적용”(Giannakourou and Taoukis, 2002), “버섯의 유통과정에서 버섯의 품질지표로서 TTI의 적용”(Bobelyn *et al.*, 2006), “우유의 열처리에 TTI의 적용”(Claeys *et al.*, 2002) 그리고 “다양한 저장상태에서 냉동어류의 유통기한의 조절을 위한 예측 모델링과 TTI의 적용”(Taoukis *et al.*, 1999) 등 다양한 종류의 식품에 대하여 보고 된 바 있다.

TTI로부터 품질을 예측하는 단계는 Fig. 1과 같다. TTI의 색 측정, 특수하게 정의된 색의 함수 식에 대입, T_{eff} (해당 이력에 대한 일종의 대표적 온도치)값 구하기, TTI와 식품의 활성화에너지 비교, 식품품질 예측식에 T_{eff} 대입, 식품의 품질 측정의 순서로 이루어 진다. 여기서 TTI로부터 품질을 정확하게 예측하는데 온도의존성이 중요한 요인으로 알려져 있다(Giannakourou *et al.*, 2005; Taoukis, 2001). 그 이유는 유통중의 온도는 dynamic하게 변하여 비록 TTI가 같은 색을 보이더라도 그 시점에서 해당식품의 품질이 항상 일정하다고 볼 수 없기 때문이다. 따라서 육류의 품질을 보기 위한 경우에서도 정확하게 품질을 대변할 수 있는 TTI의 요건에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

식품품질의 변화를 kinetic 모델을 사용해서 계산하기 위하여 변화율을 포함하는 미분 방정식으로 구성된 수식들을 풀이하는 데는 analytical 해법 및 수치해석(numerical analysis)이 가능하다(Geankoplis, 1983). TTI의 색 변화는 analytical 해법에 의하여 계산해서 식품품질과 연관시키는 방식이 적용되어 왔다(Giannakourou *et al.*, 2005). 그런데 실제 유통과정 중 온도는 일정하지 않기 때문에 단순히 analytical 해법이 매우 제한되어 수치해석을 도입하여 보다 다양한 온도-시간 이력조건에서 TTI의 변화를 simulation 할 필요성이 부각된다.

본 연구에서는 육류의 일반적인 유통경로의 온도-시간 이력 조건하에서 TTI의 온도의존성을 수치해석으로

simulation 하였다. 먼저 유통경로를 도출한 쇠고기의 냉장 운반, 판매장 에서의 저장, 판매장으로부터 소비자 구매의 3단계로 구분하여 세가지 온도-시간 조건으로 설정하였다. TTI의 수치해석에는 Euler's method를 사용 하였으며 계산에 필요한 TTI의 매개변수들은 기존 연구사례로부터 인용하여 사용하였다. Simulation 결과는 온도의존성을 중심으로 분석하여 육류의 품질(예, 미생물 증식) 예측에 가장 적합한 TTI의 조건을 제시하였다.

재료 및 방법

TTI 색의 kinetic 모델

효소형 TTI의 온도-시간 이력에 따른 변화는 색을 측정하여 식 (1)과 같은 색 함수를 정의하여 성공적으로 적용되어 왔다(Giannakourou and Taoukis, 2002).

$$F(X_c) = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{1-X_c}\right)} \tag{1}$$

$$X_c = \frac{C - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \tag{2}$$

$$C = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

여기서 $F(X_c)$ 는 색 함수 값이며 X_c 와 C 는 중간매개변수, 그리고 a^* , b^* 는 CIE의 값이다. a^* 값은 (-)에서 (+)로 변할 때 greenness가 작아지고 redness가 증가하는 것, b^* 값은 (-)에서 (+)로 변할 때 blueness가 작아지고 yellowness가 증가하는 것을 의미한다. 또한 온도 의존성은 Arrhenius식으로 나타내었다. 그리고 TTI의 $F(=F(X_c))$ 값의 변화 kinetics는 식 (4)와 같이 0차 반응으로 알려져 있다. 식 (4)을 F 를 t 에 대해 변화율로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{dF}{dt} = k \tag{4}$$

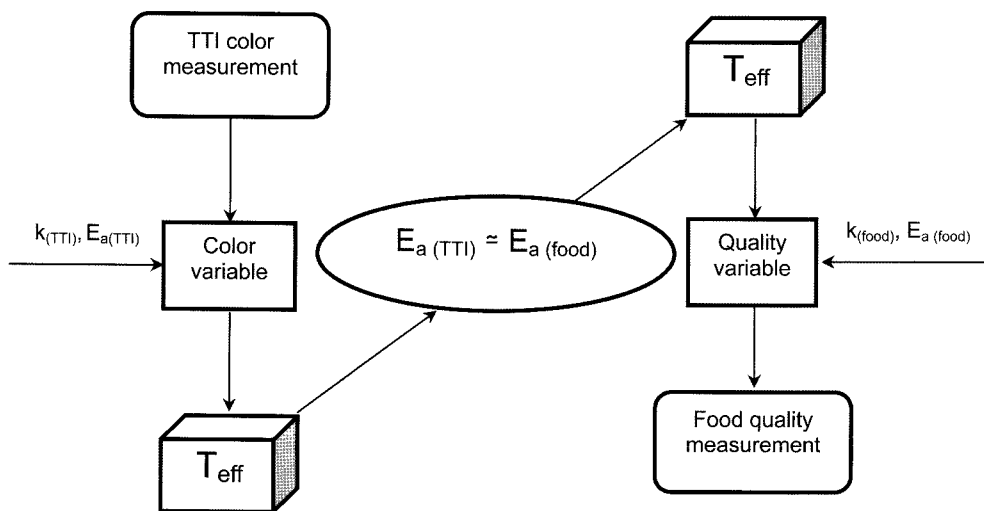


Fig. 1. TTI implementation algorithm (modified from Giannakourou *et al.* (2005) and Taoukis and Labuza (1989)).

여기서 t 는 TTI의 색 변화 시간(h), k 는 t 변화량에 따른 F 의 변화량을 의미하는 반응속도상수(h^{-1})이다. 그리고 k 를 온도의존성을 나타내는 Arrhenius 식은 다음과 같다.

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \quad (5)$$

여기서 k_0 는 k 의 기준값(h^{-1}), E_a 는 활성화에너지(kJ/mol), R 은 기체상수(8.314×10^{-3} kJ/mol · K), T 는 절대온도(K)를 의미한다. 식 (4)의 F 를 시간에 따라 계산하기 위해서는 적분을 해야 하는데 k 값이 시간-온도에 따라 일정치 않기 때문에 analytical 해법이 불가능하다. 따라서 다음과 같이 수치해석을 적용하였다.

수치해석

수치해석 방법으로 Euler's method를 적용하였다(Macdonald *et al.*, 2008).

$$F_{i+1} = F_i + \left(\frac{dF}{dt}\right)_i \cdot \Delta t \quad (6)$$

여기서 i 는 임의의 저장 시점을 나타낸다($t = \Delta t \cdot i$). 식 (6)에 F 의 변화율을 식 (4)와 식 (5)로부터 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\left(\frac{dF}{dt}\right)_i = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T_i}\right) \quad (7)$$

그런데 Arrhenius 식을 회귀분석 할 때 그 정확성을 높이기 위하여 식 (5)를 식 (8)로 변형하여 사용된 바 있다 (Taoukis *et al.*, 1999).

$$k = k_{ref} \cdot \exp\left[\frac{-E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \quad (8)$$

여기서 k_{ref} 는 T_{ref} 일 때 반응속도상수(h^{-1}), T_{ref} 는 TTI의 가장 낮은 저장 온도(reference temperature, K)를 의미한다. 따라서 식 (8)을 사용하여 식 (7)을 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$\left(\frac{dF}{dt}\right)_i = k_{ref} \cdot \exp\left[\frac{-E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \quad (9)$$

결과적으로 식 (6)과 식 (9)를 연동하여 t 에 따른 F 를 계산하였다.

컴퓨터 프로그래밍

수치해석의 연산을 위해 알고리즘을 Fig. 2와 같이 구성하였다. MS Excel 2007의 visual basic application(VBA)을 개발도구로 사용하여 수치해석 연산을 하였다. t 에 따

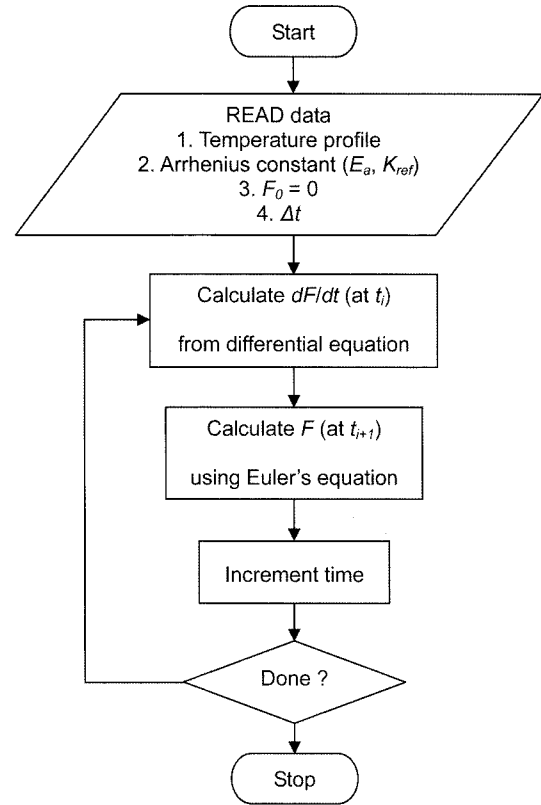


Fig. 2. Flow chart for numerical solution.

른 F 값을 연산하여 Excel의 spreadsheet 및 graph로 직접 나타내도록 하였다.

T_{eff} 의 연산

T_{eff} 는 일종의 유통경로의 온도-시간 이력을 대표하는 온도 값으로 실제 육류의 품질 계산에 사용되는 값이다 (Giannakourou *et al.*, 2005).

$$F_{0 \rightarrow t} = k_{ref} \cdot \exp\left[\frac{-E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{eff}} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \cdot t \quad (10)$$

여기서 $F_{0 \rightarrow t}$ 는 상기 수치해석을 통하여 계산된 임의의 시간 t 에서 나온 F 값을 의미한다. 따라서 식 (10)을 T_{eff} 에 대해 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$T_{eff} = \frac{E_a \cdot T_{ref}}{E_a - R \cdot T_{ref} \cdot \ln\left(\frac{F_{0 \rightarrow t}}{k_{ref} \cdot t}\right)} \quad (11)$$

육류 품질변화의 kinetic 모델

육류 품질변화의 대표적 인자인 *Pseudomonas spp.* 증식을 예로 하여 TTI의 온도의존성에 따른 품질예측 값의 일관성을 분석하였다. TTI로부터 계산된 T_{eff} 로부터 미생물의 증식은 식 (12)와 같이 계산할 수 있다(Taoukis *et al.*, 1999).

$$\ln(N/N_o) = k_{ref} \cdot \exp\left[\frac{-E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{eff}} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \cdot t \quad (12)$$

여기서 t 는 저장시간(h), N_o 및 N 는 균의 초기 및 t 에서의 농도, k_{ref} 는 T_{ref} 에서의 균 성장 속도상수(h^{-1}), E_a 는 활성화 에너지(kJ/mol), R 은 기체상수(8.314×10^{-3} kJ/mol · K) 그리고 T_{eff} 는 해당 이력에 대한 TTI로부터 계산된 대표적 온도 값을 의미한다.

결과 및 고찰

TTI의 매개변수 조건

Simulation에는 상용제품인 3가지 효소형 TTI의 매개변수 값을 일부 수정하여 사용하였다(Table 1). TTI type L (Lee and Lee, 2008), TTI type B(Taoukis *et al.*, 2001) TTI type M(Giannakourou and Taoukis, 2002)의 Arrhenius 매개변수 값을 사용하였으며, E_a 는 활성화에너지, k_{ref} 는 반응속도상수(h^{-1})의 기준값, T_{ref} 는 TTI 저장의 가장 낮은 온도(reference temperature, K)를 의미한다. 여기서, 활성화 에너지란 반응을 일으키는 데 필요한 최소한의 에너지를 나타내며 Taoukis 등(2001)에 의하면 식품과 TTI의 정밀한 품질 예측을 위하여 활성화에너지의 차이가 적어야 한다고 보고된 바 있다.

온도-시간 조건

Simulation에 사용한 육류의 온도-시간 조건은 쇠고기의 유통 경로를 예로 하여 Fig. 3와 같이 설정하였다. 국내산 쇠고기의 유통경로는 Rhee 등(1996)에 의하면 산지도축장, 축협직매장, 정육점(혹은 슈퍼마켓) 등을 거쳐 소비자에게 이루어진다. 유통경로의 시간에 따른 온도 값은 세가지 경로로 구분하여 설정하였다. CaseI은 도축장에서 직판장까지 cold-chain 형태로 차량 운반할 경우로서, 냉장식품을 0-10°C에서 관리하는 조건으로 약 36시간을 설정하였다(Lee *et al.*, 2008). CaseII은 판매장에서 냉장보관 하는 경우로서, 2-4°C에서 약 2일을 설정하였다(Park *et al.*, 2000). CaseIII은 직판장에서 집까지 쇼핑백으로 포장육을 구매한 경우로서, 5°C에서부터 실온에 근접한 온도인 20°C까지 서서히 증가하는 조건을 최대 24시간까지 설정하였다.

F(X_o)의 simulation

TTI의 색 함수인 $F(X_o)$ 를 simulation한 결과는 Fig. 4에

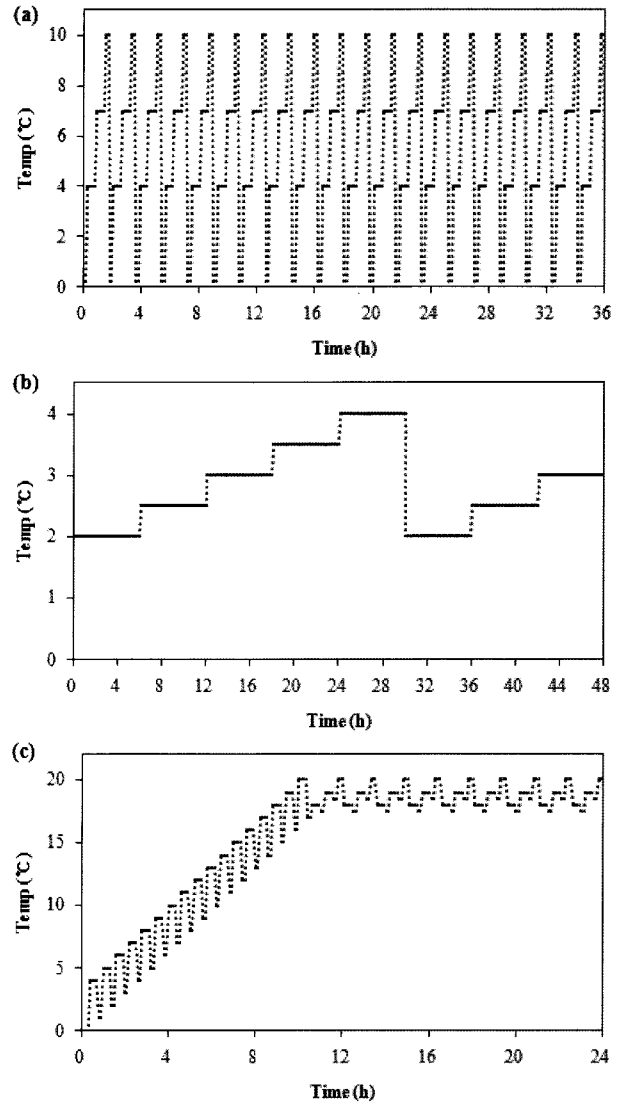


Fig. 3. Time-temperature profiles in three beef distribution cases. (a): caseI(distribution to market), (b): caseII (storage condition at market), (c): caseIII (distribution after purchase).

나타내었다. 여기서 $F(X_o)$ 는 식 (1)을 사용하는 구하여진 색에 대한 함수 값이다. 활성화에너지가 가장 작은 TTI L형은 가장 높은 $F(X_o)$ 을 보여 활성화에너지가 낮을수록 같은 시간대에 반응이 빠르게 일어남을 확인하였다. 또한 세가지 온도-시간 이력 조건에서 모두 비슷한 $F(X_o)$ 값을 보였으며 온도가 낮은 caseIII의 조건에서도 높은 결과를 보여 활성화에너지가 낮은 경우에는 낮은 온도에서도 반응이 빠르게 일어남을 확인하였다. TTI B형은 그 활성화에

Table 1. Kinetic parameters for different types of TTI and *Pseudomonas* spp. growth

	TTI Type L	TTI Type B	TTI Type M	<i>Pseudomonas</i> spp.
E_a (kJ/mol)	30.9	81.6	99.5	81.6
k_{ref} (h^{-1})	0.223	1.291×10^{-2}	4.760×10^{-4}	4.4×10^{-2}
T_{ref} (K)	273	273	253	273

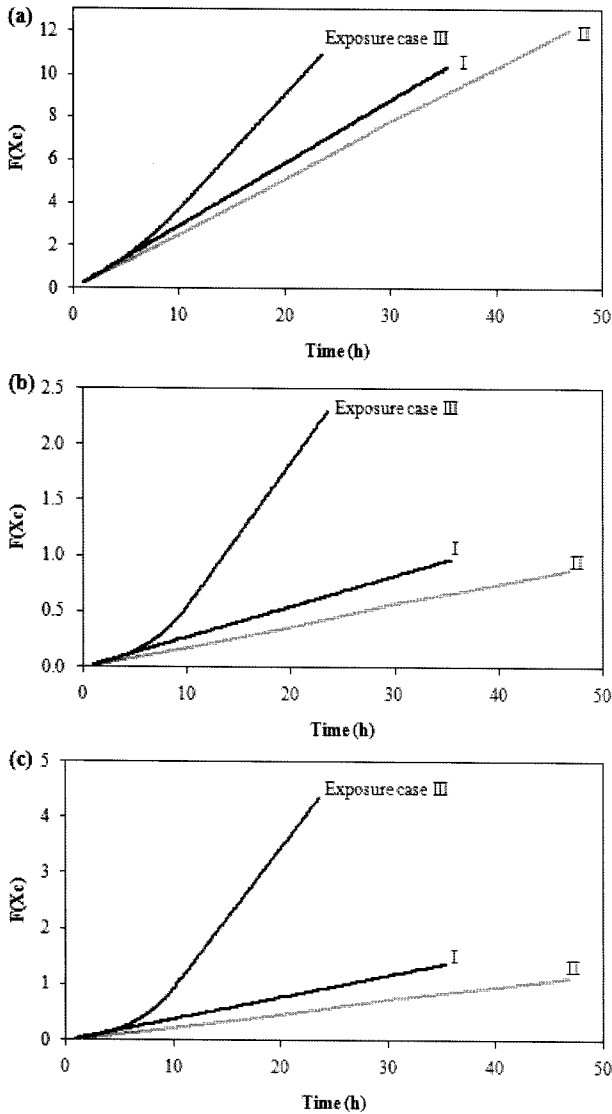


Fig. 4. Time course of $F(X_c)$ of different types of TTI in three beef distribution cases. (a): TTI type L, (b): TTI type B, (c): TTI type M.

너지가 *Pseudomonas*와 제일 유사하여, 세가지 경우 중 균 성장과 온도의존성이 같은 경우로 정하기 위하여 그 값을 균 성장의 값과 같게 수정하여 사용하였다. 온도가 가장 높은 caseIII의 유통조건에서 월등히 높은 $F(X_c)$ 값을 보인 반면 낮은 온도유통 조건에서는 비슷한 크기 및 형태의 증가경향을 보였다. 활성화 에너지가 가장 높은 TTI M형은 전반적으로 B형과 비슷한 경향의 증가 추세를 보였다. TTI L형과 B형의 활성화에너지 크기의 차이는 50.7 kJ/mol 인 반면, B형과 M형의 활성화에너지 크기의 차이는 17.9 kJ/mol임으로 활성화에너지의 크기 차이가 작을수록 비슷한 경향의 변화를 일으킴을 확인하였다.

T_{eff} 의 simulation

세가지 온도-시간 조건에 대한 TTI의 T_{eff} 의 simulation 결과는 Fig. 5에 나타난 바와 같다. 같은 유통조건에서의

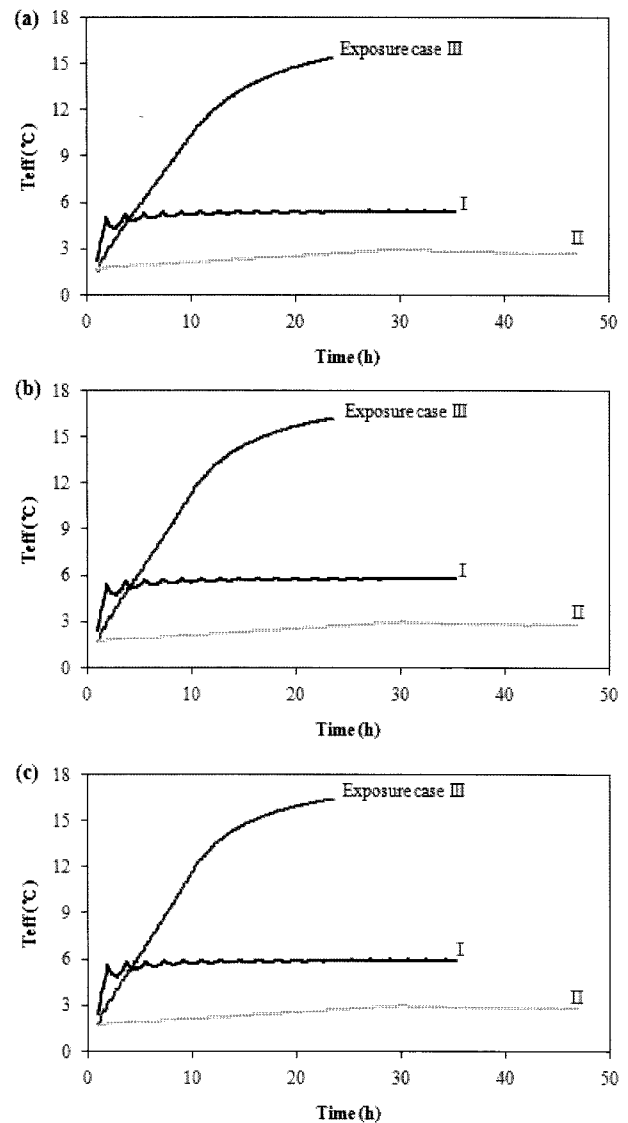


Fig. 5. Time course of T_{eff} of different types of TTI in three beef distribution cases. (a): TTI type L, (b): TTI type B, (c): TTI type M.

T_{eff} 는 활성화에너지가 다른 세가지 TTI에서 모두 비슷한 형태의 증가 경향을 보였다. 여기서 T_{eff} 는 해당이력에 대한 일종의 대표적 온도 값을 의미하는데, Giannakourou 등 (2005)에 의하면 다양한 온도의 분포에 대하여 결과적으로 같은 품질변화를 일으키는 불변의 온도로 정의되었다. Taoukis 등(1999)에 의하면 다양한 다른 온도의 분포에서 구하여진 TTI의 T_{eff} 는 생선의 유통기한을 예측하는 함수식에 대입하여 품질을 예측한 보고가 있다. Taoukis(2001)에 의하면 T_{eff} 가 1°C의 오차를 보일 때 품질의 평가는 10-15% 범위의 오차를 보이며 이정도 범위는 다수의 경우에 수용할 만한 수준이라고 하였다.

육류 품질변화(미생물 증식)의 simulation

TTI의 품질변화를 나타내는 값을 의미하는 $F(X_c)$ 가 일정한 수준을 나타낼 경우, TTI의 T_{eff} 로부터 *Pseudomonas*

Table 2. Calculation of T_{eff} and the growth ($\ln(N/N_0)$) of *Pseudomonas* spp. for different types of TTI (types B, L, M)

$F(X_c)$	Type B			Type L			Type M					
	$E_{a,TTI} = E_{aPseudomonas}$			$E_{a,TTI} > E_{aPseudomonas}$			$E_{a,TTI} < E_{aPseudomonas}$					
	t (h)*	T_{eff} (K)	$\ln(N/N_0)$	t (h)	T_{eff} (K)	$\ln(N/N_0)$	t (h)	T_{eff} (K)	$\ln(N/N_0)$			
0.5	t	10	283.68	1.7041	t	1.84	277.02	0.1365	t	7.5	282.52	1.1077
	t	17	279.40	1.7041	t	1.92	276.15	0.1272	t	13	278.89	1.2229
	t	26	276.06	1.7041	t	1.95	275.83	0.1241	t	22	275.52	1.3443
0.7	t	11	285.68	2.3857	t	2.41	278.40	0.1272	t	9	283.55	1.5084
	t	26	278.70	2.3857	t	2.51	277.56	0.1993	t	17.5	279.15	1.7001
	t	38	275.73	2.3857	t	2.75	275.68	0.1716	t	29	275.90	1.8618
0.9	t	12	287.05	3.0674	t	3.11	278.33	0.1241	t	10	284.53	1.8891
	t	31	279.30	3.0674	t	3.19	277.80	0.2612	t	23.5	278.87	2.2029
	t	46	276.19	3.0674	t	3.56	275.54	0.2182	t	38	275.78	2.4019

* t_I - t_{III} are the times taken to reach 0.5 and 0.

의 증식수준을 예측 하였다. TTI가 일정 수준의 $F(X_c)$ 에 도달하는데 까지 걸린 시간 t 를 구하였다. 미생물 증식을 예측하는데 사용되는 매개변수들은 Table 1과 같았다(Taoukis *et al.*, 1999). Table 2에서 t_I 은 세가지의 유통 경로 중 CaseI에 대한 t 값을, t_{II} 는 CaseII에 대한 t 값을, t_{III} 는 caseIII에 대한 t 값을 나타낸다. 활성화에너지의 크기가 다른 각 TTI에 대한 t_I , t_{II} , t_{III} 는 전부 다른 값을 보였다. 이는 TTI의 활성화에너지 크기에 따라 특정 수준까지 변하는 속도가 다르기 때문으로 이해된다. TTI가 일정한 값에 도달하는 동안의 대표적 온도 값을 나타내는 T_{eff} 는 각 TTI의 t_I , t_{II} , t_{III} 을 식(11)에 대입하여 구하였다. 활성화에너지의 크기가 다를수록 T_{eff} 는 서로 다른 결과를 나타냈는데 이는 활성화에너지가 다른 TTI는 dynamic한 온도-시간 조건에서 특정한 수준까지 도달하기 위한 시간이 다르기 때문이며 결국 T_{eff} 도 다르게 된다. Taoukis(2001)에 의하면 TTI와 식품의 활성화에너지의 크기 차이가 40(kJ/mol)이하일 때, 일반적으로 두 T_{eff} 의 차이는 0.4에서 1.8°C의 차이를 보인다고 보고 된바 있다. 결국 활성화에너지 크기의 차이가 클수록 특정 수준까지 변화하는데 걸린 시간의 차이가 커지며 이는 T_{eff} 의 차이도 크게 만드는 것을 알 수 있다.

각 시점에서의 *Pseudomonas* 증식도인 $\ln(N/N_0)$ 값을 계산한 결과, $E_{a,TTI} = E_{aPseudomonas}$ 인 경우인 TTI B형의 $F(X_c)$ 가 0.5 수준으로 동일한 수준의 색 변화를 보일 때 예측되는 증식도 수준은 항상 같은 값을 보이는 결과를 알 수 있다. 반면 $E_{a,TTI} \neq E_{aPseudomonas}$ 인 경우인 TTI L형과 M형의 $F(X_c)$ 가 0.5 수준으로 같은 수준의 색 변화를 나타냈음에도 불구하고 모든 유통경로에서의 예측되는 증식도 수준은 서로 다른 결과를 보였다. TTI의 색 변화가 더욱 진행되어 $F(X_c)$ 가 0.7 수준으로 증가하였을 때 $E_{a,TTI} = E_{aPseudomonas}$ 인 TTI B형의 경우에서는 TTI의 T_{eff} 로부터 예측되는 증식도의 수준은 2.3857로 증가하였으며 모든 유통 경로에서 같은 수준의 결과를 보였다. 반면 TTI L형과 M형의 T_{eff} 로부터 예측되는 *Pseudomonas* 증식도의 수준은 모

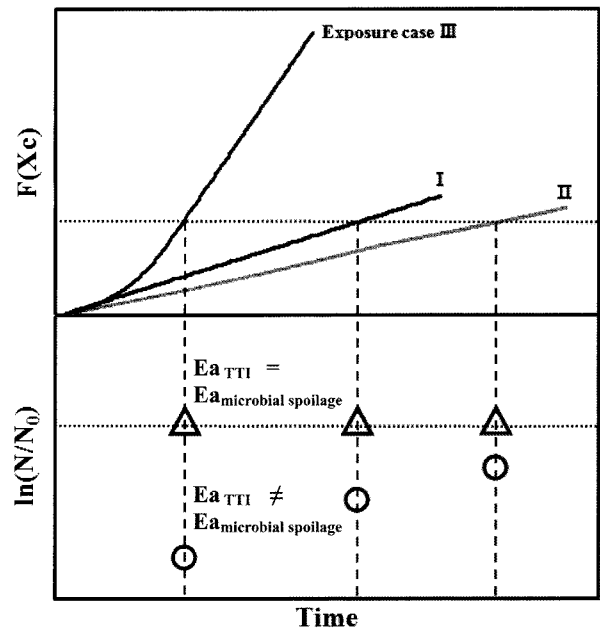


Fig. 6. Schematic of TTI color and corresponding food qualities (ex. microbial spoilage). If $E_{a,TTI} = E_{a_{microbial\ spoilage}}$, then the spoilage is constant at the same TTI color value ($F(X_c)$), regardless of time-temperature profiles, whereas if $E_{a,TTI} \neq E_{a_{microbial\ spoilage}}$, then the spoilage varies even at the same TTI color value.

든 유통 경로에서 다른 값을 보여 활성화에너지의 크기가 다를 경우 TTI가 같은 색을 나타내에도 불구하고 예측되는 미생물 증식수준은 유통경로에 따라 다른 수준을 보이는 경향을 다시 한번 확인 하였다. TTI의 색 변화가 더욱 진행되어 $F(X_c)$ 가 0.9 수준으로 증가하였을 때 TTI B형의 T_{eff} 로부터 예측되는 미생물 증식수준은 모든 유통경로에서 3.0674의 값으로 같은 수준의 변질이 일어남을 확인하였다. 반면 TTI L형과 M형의 T_{eff} 로부터 예측되는 쇠고기의 변질수준은 모든 유통 경로에서 서로 다른 값을 보였다.

결과적으로 TTI와 육류 품질변수의 활성화에너지가 같다면 모든 유통 저장 구간에서 TTI의 색 변화가 일정할

때 변질의 정도 역시 일정한 수준을 보임을 simulation을 통하여 확인할 수 있었다. 따라서, 특정 육류 제품에 대한 적합한 TTI는 그 온도의존성이 일치할 때 가장 정확한 예측 값을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

요 약

육류의 품질예측에 가장 적합한 TTI의 조건을 분석하기 위하여, 온도-시간 이력에 따른 TTI의 색 변화와 *Pseudomonas* spp.의 증식수준을 수학적으로 simulation 하였다. 일련의 kinetics 및 온도의존성 관련 함수식의 연산에는 수치해석 기법인 Euler's method를 적용하였으며, MS Excel VBA 기반 컴퓨터 프로그램을 작성하여 계산하였다. 쇠고기의 저장 유통에 대한 몇 가지 온도-시간 경로에 대하여, 저장 시간에 따른 TTI 색 함수 및 T_{eff} (해당 온도-시간 이력에 대한 일종의 대표적 온도 값)의 변화를 simulation 하였다. 온도의존성(활성화에너지)이 서로 다른 TTI에 대하여 simulation한 결과, 먼저 *Pseudomonas* 증식의 활성화에너지와 같은 활성화에너지를 갖는 TTI의 경우 같은 색에 대하여 온도-시간 이력에 상관없이 항상 같은 증식수준을 나타냈다. 반면에 활성화에너지가 서로 다른 경우 TTI가 같은 색에 대하여 온도-시간 이력에 따라 서로 다른 증식수준을 나타냈다. 결론적으로 육류의 특정 품질에 대한 적합한 TTI는 서로 온도의존성이 일치할 때 가장 정확한 예측 값을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 농림수산식품부에서 주관하는 농림기술개발 연구과제의 일부로 이루어진 바, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- Bin, F. U., Taoukis, P. S., and Labuza, T. P. (1991) Predictive microbiology for monitoring spoilage of daily products with time-temperature integrators. *J. Food Sci.* **56**, 1209-1215.
- Bobelyn, E., Hertog, M., and Nicolai, B. M. (2006) Applicability of an enzymatic time temperature integrator as a quality indicator for mushrooms in the distribution chain. *Postharvest Biol. Tec.* **42**, 104-114.
- Claeys, W.L., Vanloey, A. M., and Hendrickx, M. E. (2002) Intrinsic time temperature integrators for heat treatment of milk. *Trends Food Sci. Tech.* **13**, 293-311.
- Emmanuel, P. and Viviana, O. S. (2009) Bread baking as a moving boundary problem. Part 2: Model validation and numerical simulation. *J. Food Eng.* **91**, 434-442.
- Geankoplis, C. J. (1983) Transport processes and unit operations, Second Edition. *Allyn and Bacon, Inc.*, London, pp. 29-33.
- Giannakourou, M. C. and Taoukis, P. S. (2002) Systematic

application of time temperature integrators as tools for control of frozen vegetable quality. *J. Food Sci.* **67**, 2221-2228.

- Giannakourou, M. C., Koutsoumanis K., Nychas, G. J. E., and Taoukis, P. S. (2005) Field evaluation of the application of time temperature integrators for monitoring fish quality in the chill chain. *Int. J. Food Microbiol.* **102**, 323-336.
- Hathaway, S. (1999) Management of food safety in international trade. *Food Control* **10**, 247-254.
- James, M. L., Smith, G. M., and Wolfond, J. C. (1977) Applied numerical methods for digital computation with FORTRAN and CSMP, Second Edition. *Harper & Row, Publishers, Inc.*, London, pp. 368-379.
- Jung, H. M., Kim, G. S., Kim, M. S., Lee, Y. H., and Choi, D. S. (2008) Quality change of the pears using processed packaging materials by charcoal during storage and distribution. *Korean J. Soc. Agr. Mach.* **13**, 272-278.
- Lee, J. M. and Lee, S. J. (2008) Kinetic modelling for predicting the qualities of beef and color of enzyme time-temperature integrator during storage. *Food Eng. Prog.* **12**, 241-246.
- Lee, Y. S., Ji, H. H., Park, K. H., Lee, S. Y., Choi, Y. J., Lee, D. H., Park, S. H., Moon, E. S., Ryu, K., Shin, H. S., and Ha, S. D. (2008) Survey on storage temperature of domestic major chilled foods in refrigerator. *J. Food Hyg. Safety* **23**, 304-308.
- Macdonald, C. B., Gottlieb, S., and Ruuth, S. J. (2008) A numerical study of diagonally split Runge-Kutta methods for PDEs with discontinuities. *J. Sci Comput.* **35**, 89-112.
- Mendoza, T. F., Welt, B. A., Otwell, S., Teixeira, A. A., Kristonsson, H., and Balaban, M. M. (2004) Kinetic parameter estimation of time-temperature integrators intended for use with packaged fresh seafood. *J. Food Sci.* **69**, 90-96.
- Park, S. Y., Kim, Y. G., Kim, J. W., Lee, S. G., Lim, H. J., Joo, S. T., and Choi, Y. I. (2000) Dairy processing. Yu Han Publisher, Co, Seoul, pp. 69-80.
- Rhee, S. Y., Cheon, D. W., and Park, J. W. (1996) An economic study on Korean native cattle marketing and stage price formation. *Korean Agr. Policy Rev.* **23**, 109-121.
- Taoukis, P. S. and Labuza, T. P. (1989) Applicability of time-temperature indicators as shelf life monitors of food products. *J. Food Sci.* **54**, 783-788.
- Taoukis, P. S., Koutsoumanis, K., and Nychas, G. J. E. (1999) Use of time-temperature integrators and predictive modeling for shelf life control of chilled fish under dynamic storage conditions. *Int. J. Food Microbiol.* **53**, 21-31.
- Taoukis, P. S. (2001) Modeling the use of time-temperature indicators in distribution and stock rotation. In: Food process modelling, 3rd ed. Tijskens, L. M. M., Hertog, M. L. A. T. M., and Nicolai, B. M. (eds), CRC Press, Washington DC, pp. 402-432.
- VITSAB. 2008. Home page. <<http://vitsab.se>>.
- Yoon, S. H., Lee, C. H., Kim, D. Y., Kim, J. W., and Park, K. H. (1994) Time-temperature indicator using phospholipids-phospholipase system and application to storage of frozen pork. *J. Food Sci.* **20**, 490-493.