

## 효소반응속도론에 기초한 단감의 호흡 모델에 관한 연구

안광환\* · 이동선<sup>1</sup>

경남농업기술원 단감연구소, <sup>1</sup>경남대학교 식품생명공학부

### Enzyme Kinetics Based Modeling of Respiration Rate for 'Fuyu' Persimmon (*Diospyros kaki*) Fruits

Gwang-Hwan Ahn\* and Dong-Sun Lee<sup>1</sup>

Sweet Persimmon Research Institute, Gyeongnam ARES

<sup>1</sup>Division of Food Science and Biotechnology, Kyungnam University

Respiration of 'Fuyu' persimmon (*Diospyros kaki*) fruits were measured in terms of oxygen consumption rate and carbon dioxide evolution by closed system experiments at 0, 5, and 20°C. Enzyme kinetics-based respiration model was used to describe respiration rate as function of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> gas concentrations ( $R = V_m[O_2]/K_m + (1 + [CO_2]/K_i)[O_2]$ ), and Arrhenius equation was applied to analyze temperature effect. V<sub>m</sub> and K<sub>m</sub> increased, while K<sub>i</sub> decreased, with increasing temperature. K<sub>m</sub> of O<sub>2</sub> consumption was greater than that of CO<sub>2</sub> evolution at equal temperature. Inhibitory effect of reduced O<sub>2</sub> level on O<sub>2</sub> consumption was more prominent than that on CO<sub>2</sub> evolution. Activation energy of respiration decreased with reduced O<sub>2</sub> and elevated CO<sub>2</sub> concentrations. Activation energy of CO<sub>2</sub> evolution was greater than that of O<sub>2</sub> consumption. Permeable package experiments verified respiration model parameters by showing good agreement between predicted and experimental gas concentrations in package.

**Key words:** respiration rate, Michaelis-Menten equation, Arrhenius equation, modified atmosphere package

## 서 론

국내 감 재배면적은 약 26,000 ha, 생산량 240,000 ton으로 사과, 배 등과 함께 주요과실에 속한다. 특히 단감은 남부지방의 산지나 경사지에 재배되어 농가소득 증대에도 크게 기여하였다. 그러나 최근 생산량의 증가와 농산물개방에 따른 소비부진으로 가격이 하락하여 단감재배농가가 어려움을 겪고 있다.

또한, 단감은 수확 후 연화, 흑변 등의 생리장해로 품질이 급속히 저하되는 것이 문제가 되고 있으며, 지금까지 단감의 선도유지에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히, 1965년 일본의 Tarutani에 의해 저밀도폴리에틸렌(LDPE) 필름을 이용한 modified atmosphere(MA) 저온저장이 단감의 선도유지에 효과적인 것으로 보고 된 이후 0.06 mm두께의 LDPE film으로 5개씩 겹쳐 포장하여 저온 저장하는 방법이 최근까지 이용되고 있다(1).

그러나 단감에서 MA 저장방법은 전처리방법, 과실의 상태, 또 저장이나 유통 온도 등에 따라 여러 가지 생리장해 현상을

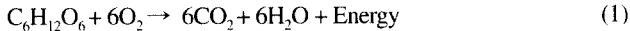
유발하는 것으로 알려져 있다(2,3). 특히 포장조건에 따라 과실의 호흡율이 필름의 가스투과량 보다 높을 경우 포장 내 저산소 및 고이산화탄소 조건이 유발되어 무기호흡에 따른 이취와 갈변과를 유발하고, 반대로 포장의 밀봉 불량 등으로 적당한 공기조성이 형성되지 않으면 흑변과 연화과 등이 발생하는 것으로 보고되고 있으며, Ben-Arie 등은 단감 MA 저장에서 저장한계 요인은 과피흑변과 및 과육갈변과의 발생이며, 감에서 이취와 과육갈변과의 발생은 산소부족 및 이산화탄소 과잉에 의한 무기호흡으로 과육내 에탄올과 아세트알데히드의 축적이 원인인 것으로 보고되었다(4-7). 또한 단감 저장 중 발생하는 생리장해방지를 위하여 필름두께, 과실크기 등 포장규격설정과 작업방법에 대한 연구가 있었으나 근본적으로 단감의 호흡특성에 대한 조사가 동반되지 않아 최적의 포장조건을 설정하는데 한계를 보였다(8-11). 또한 단감의 저온저장 후 고온 유통시 발생하는 저온장해 및 에틸렌에 의한 연화를 방지하는데 MA포장이 효과적인 것으로 제시되었으나 포장규격을 설정하기 까지는 연구되지 못하였다(12-15). 따라서 유통온도와 포장조건에 따른 단감의 호흡특성에 대한 조사와 적합한 MA 포장설계가 요구된다.

본 연구는 단감의 최적 MA 포장조건을 설계하기 위하여, 단감의 호흡에 미치는 온도와 호흡가스인 산소, 이산화탄소의 영향을 화학반응식을 사용하여 modeling하고 이를 검토하고자 하였다.

\*Corresponding author: Gwang-Hwan Ahn, Sweet Persimmon Research Institute, Gyeongnam ARES, Gimhae 621-802, Korea  
 Tel: 82-55-343-4233  
 Fax: 82-55-346-0441  
 E-mail: ahngh1@kornet.net

**호흡 모델**

MA 포장은 신선과채류의 호흡과 포장필름을 투과하는 가스의 상호작용으로 포장내에 적정수준의 저산소와 고이산화탄소 농도를 형성하여 신선 과채류의 호흡량을 떨어뜨리고, 에틸렌 작용과 곰팡이와 같은 미생물에 의한 부패를 억제하여 품질을 보존하고 손실을 줄이는 중요한 기술이다(16-18). 따라서 포장 내 적정공기조성을 유도하기 위한 포장조건의 설계에는 신선 과채류의 호흡특성과 포장필름에 대한 각 가스의 투과도에 대한 정보가 있어야 한다. 특히 신선과채류의 호흡은 온도 및 산소와 이산화탄소의 농도에 영향을 받으므로 이들이 대상작물의 호흡에 미치는 영향을 수량화할 필요가 있다.



신선 농산물의 호흡작용을 식 1과 같은 화학반응의 개념으로 단순화하여 효소반응속도론을 호흡모델로 이용하는 연구가 많이 수행되었다(18-21). 즉 식 1에서 산소는 호흡의 반응물로 작용하며, 이산화탄소는 생성물 또는 반응속도를 저해하는 물질로 작용한다.

먼저 호흡에 미치는 산소의 영향을 평가할 때 즉 이산화탄소가 없거나 그 효과가 적을 때에는 식 2의 Michaelis-Menten 효소반응속도식을 사용한다(22-24).

$$R = \frac{V_m [O_2]}{K_m + [O_2]} \quad (2)$$

여기서 R은 호흡율(mL/kg · hr), V<sub>m</sub>은 반응 초기의 최대호흡율(mL/kg · hr), K<sub>m</sub>은 Michaelis-Menten 상수, [O<sub>2</sub>]는 산소농도(%)이다.

만약 이산화탄소가 호흡속도를 저해하는 역할을 할 경우에는 식 3의 비경쟁억제 효소반응속도식을 모델로 사용하는 것이 일반적이다(22,23,25).

$$R = \frac{V_m [O_2]}{K_m + (1 + [CO_2]/K_i)[O_2]} \quad (3)$$

여기서 K<sub>i</sub>는 억제 상수, [CO<sub>2</sub>]는 이산화탄소 농도(%)이다. 또한 온도는 호흡속도에 미치는 가장 중요한 요인으로, 호흡속도와 절대온도와의 관계는 식 4의 Arrhenius식으로 표시할 수 있다(26).

$$R = A \exp(-E/(R^*T)) \quad (4)$$

여기서 A는 Arrhenius상수, E는 활성화에너지(J/mol), R\*는 이상기체상수(J/mol · K), T는 절대온도(K)이다.

**재료 및 방법**

**공시과실**

단감 시료는 2002년 경남 김해시 진영지역의 20-25년생 부유품종(*Diospyros kaki* cv. Fuyu) 과원에서 관행으로 재배하여 성숙기(11월 3일)에 수확한 과실을 과중이 200-250g이고, 적도부의 색도(Japanese color chart)가 4.5-5.0인 것을 선과한 후, 0, 5, 20°C 항온실로 이동하여 하룻밤 동안 적응시킨 후 시험재료로 사용하였다.

**호흡율 조사**

호흡율 측정은 폐쇄계방법(closed system method)(27,28)을 이용하였다. 0, 5, 20°C의 각 온도에서 3,000 mL 밀폐용기에 단

**Table 1. Gas permeabilities of low density polyethylene films used for packaging of persimmon fruit at 0, 5, and 20°C (n=5)**  
(unit: mL · m<sup>-2</sup> · hr<sup>-1</sup> · atm<sup>-1</sup>)

Temperature (°C)	O <sub>2</sub> gas permeability ± S.D	CO <sub>2</sub> gas permeability ± S.D
0	32 ± 3.2	190 ± 5.2
5	83 ± 4.5	302 ± 10.4
20	142 ± 6.7	557 ± 13.4

감과실을 넣고 일정 시간간격으로 호흡가스인 산소와 이산화탄소의 농도 변화율을 조사한 후, 시료의 무게와 용기의 부피를 감안하여 호흡율을 구하였다. 산소와 이산화탄소의 분석조건은 gas chromatograph(HP 5890 series II, Hewlett Packard Co., USA) detector, TCD; column, CTR-1(Alltech Co., USA); column temperature, 60°C; detector temperature, 120°C; carrier gas, He(50 mL/min)이었다.

**호흡모델 parameter 검정을 위한 MA 포장내 공기변화조사**

호흡모델 parameter들을 검정하기 위해 MA 포장시험을 실시하였다. 각 온도에서 공시 과실을 두께가 52 μm인 LDPE film 봉지에 1개씩 열접착 밀봉한 후 저장기간별로 포장내 공기조성변화를 조사하였다. 이때 포장조건은 표면적이 392 cm<sup>2</sup>(길이 14.5 cm×폭 13.5 cm)이고 free-volume이 120±10 mL%였다. 포장필름의 가스투과도는 quasi-isostatic method(29)로 조사하였고, 산소와 이산화탄소 농도 조사는 gas chromatograph를 사용하였다. 각 온도별 산소와 이산화탄소 가스 투과도는 Table 1에 제시하였다.

**통계처리**

Closed system method에서 산소와 이산화탄소 농도 변화율을 얻기 위한 회귀식과 효소반응속도론의 호흡모델 parameter를 구하는 다중선형회귀식은 상용 program(Excel, Microsoft Co., USA)을 이용하여 계산하였고, 포장 내 가스농도 변화 예측을 위한 미분방정식 계산은 상용 program(Mathcad, MathSoft Inc., USA)을 이용하였다.

**결과 및 고찰**

**호흡율 조사**

Fig. 1은 0, 5 및 20°C 각 온도에서 closed system method에 의해 조사된 호흡용기 내 산소와 이산화탄소 농도의 시간에 따른 변화를 나타내었다.

호흡량을 구하기 위하여 시간에 따른 용기 내 각 산소와 이산화탄소의 농도변화를 회귀식으로 fitting하고, 이를 1차 미분하여 농도변화율을 구하고 시료의 무게, 용기부피를 감안하면 각 시점에서 호흡율이 얻어진다. 회귀식에는 일차함수(30), 분수함수(25), 2차함수(31) 등이 제시되어있으나, 본 시험에서는 Gong and Corey가 제안한 2차식을 사용하였다(식 5, 6).

$$[O_2] = a_{10}t^2 + a_{11}t + a_{12} \quad (5)$$

$$[CO_2] = b_{10}t^2 + b_{11}t + b_{12} \quad (6)$$

여기서 a와 b는 회귀식 계수이고 t는 경과시간(hr)이다.

Fig. 2는 20°C에서 chamber내의 산소와 이산화탄소 농도 변화를 2차식으로 fitting한 실례이고, 이와 같은 방법으로 각 온도별 과실시료의 중량과 용기부피 및 산소와 이산화탄소 각각

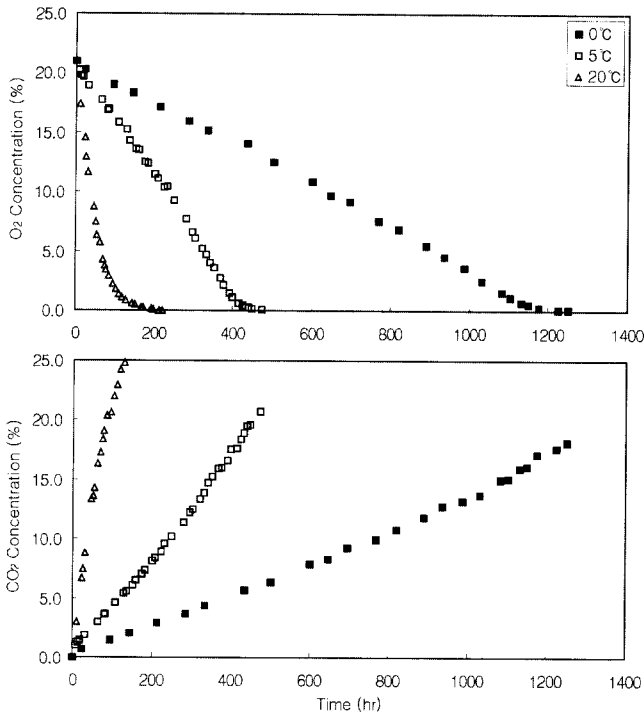


Fig. 1. Plot of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> gas concentration changes inside closed chambers containing persimmon fruits at 0, 5, and 20°C.

에 대한 regression coefficient를 구하여 Table 2에 나타내었다. Closed chamber내 최초 공기는 air를 사용하였으므로 a<sub>12</sub>(최초 산소농도)와 b<sub>12</sub>(최초 이산화탄소 농도)는 각각 20.8%와 0.03%이다. 선형회귀결과 결정계수는 0.99 이상으로 높았다.

$$R_{O_2} = \frac{-(a_{11} + 2a_{10}t) \times V}{(W \times 100)} \quad (7)$$

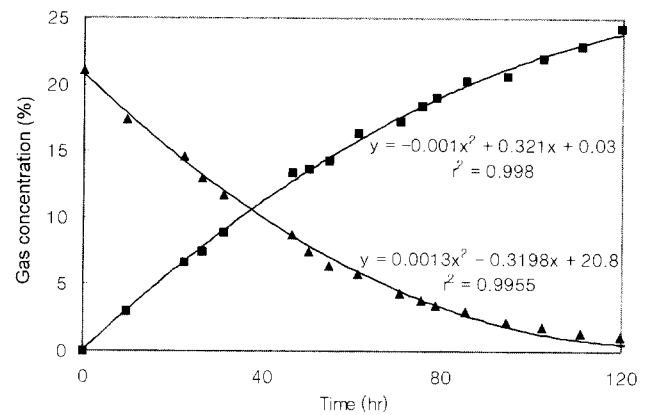


Fig. 2. Gas concentration (vol%) profiles and Eq. (5), (6) fits for the persimmon fruits in closed chamber at 20°C. Triangles and squares represent oxygen and carbon dioxide, respectively.

$$R_{CO_2} = \frac{(b_{11} + 2a_{10}t) \times V}{(W \times 100)} \quad (8)$$

여기서 R<sub>O<sub>2</sub></sub>는 산소소비 호흡량(mL/kg · hr), R<sub>CO<sub>2</sub></sub>는 이산화탄소 발생 호흡량(mL/kg · hr), V는 용기부피(mL), W는 시료의 무게(kg)이다.

Table 2의 regression coefficient와 시료의 무게, 용기부피를 식 7, 8에 대입하여 각 시점에서 온도별 호흡율을 구하고, 또 같은 시점에서 실험으로 얻어진 각 용기 내 공기 농도를 사용하여 Lee 등이(22) 제안한 비경쟁역제 효소반응속도식(식 3)의 호흡모델 parameter를 통계적으로 구하여 Table 3에 나타내었다. V<sub>m</sub>(maximum respiration rate)과 K<sub>m</sub>(Michaelis-Menten constant)은 온도가 올라갈수록 증가하는 경향이었고, K<sub>i</sub>(inhibition constant)는 감소하는 경향이였다. 이는 Mahajan 등(32)이 사과

Table 2. Fruits weight, chamber free volume, and Eq. (5) and Eq. (6) coefficient values for persimmon fruits at 0, 5, and 20°C

Temperature (°C)	Weight (kg)	Coefficient values <sup>1)</sup>					
		a <sub>10</sub>	a <sub>11</sub>	r <sup>2</sup> <sub>a</sub>	b <sub>10</sub>	b <sub>11</sub>	r <sup>2</sup> <sub>b</sub>
0	0.468	4.0 × 10 <sup>-7</sup>	-0.0179	0.999	-1.0 × 10 <sup>-7</sup>	0.0133	0.993
5	0.424	4.0 × 10 <sup>-6</sup>	-0.0486	0.995	-5.0 × 10 <sup>-7</sup>	0.0416	0.998
20	0.388	1.3 × 10 <sup>-3</sup>	-0.3198	0.998	-1.0 × 10 <sup>-2</sup>	0.3210	0.998

<sup>1)</sup>Free volumes of closed chamber are 3000 mL, initial O<sub>2</sub> concentration (a<sub>12</sub>) and CO<sub>2</sub> concentration (b<sub>12</sub>) are 20.8% and 0.03%, respectively.

Table 3. Estimates of respiration model parameters for Eq. (3) for persimmon fruits at 0, 5, and 20°C

Temperature (°C)	V <sub>m</sub> <sup>1)</sup> (mL · hr <sup>-1</sup> · kg <sup>-1</sup> )	K <sub>m</sub> <sup>2)</sup> (% O <sub>2</sub> )	K <sub>i</sub> <sup>3)</sup> (% CO <sub>2</sub> )	r <sup>2</sup> <sup>4)</sup>
Parameters for O <sub>2</sub> consumption curve				
0	0.9715	0.0077	290.6	1.0000
5	2.9557	0.0132	245.0	1.0000
20	32.7392	10.7159	59.61	1.0000
Parameters for CO <sub>2</sub> evolution curve				
0	0.7196	0.0011	875.5	1.0000
5	2.5275	0.0054	519.8	1.0000
20	25.4278	3.2500	44.61	0.9992

<sup>1)</sup>Maximum respiration rate.

<sup>2)</sup>Michaelis-Menten constant.

<sup>3)</sup>Inhibition constant.

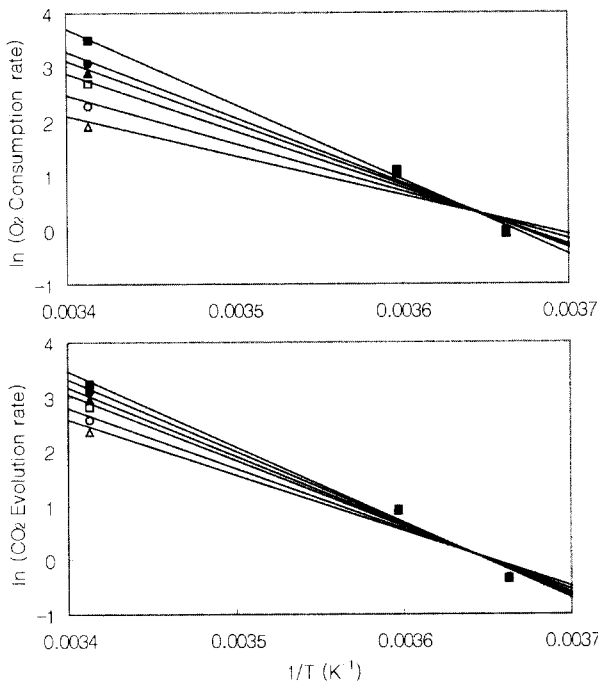
<sup>4)</sup>Coefficient of determination.

**Table 4. Estimates of respiration model parameters for Arrhenius equation for persimmon fruits at selected gas composition and  $V_m$**

Gas composition (%)		Parameters for O <sub>2</sub> consumption respiration rate			Parameters for CO <sub>2</sub> evolution respiration rate		
O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	A <sup>1)</sup>	E <sup>2)</sup>	r <sup>2</sup>	A	E	r <sup>2</sup>
20	0.5	1.80 × 10 <sup>19</sup>	100.40	0.989	1.08 × 10 <sup>21</sup>	110.30	0.987
15	5	1.52 × 10 <sup>18</sup>	94.79	0.985	1.32 × 10 <sup>20</sup>	105.52	0.983
10	8	6.82 × 10 <sup>16</sup>	87.73	0.976	1.62 × 10 <sup>19</sup>	100.74	0.978
5	12	1.30 × 10 <sup>14</sup>	73.43	0.947	4.08 × 10 <sup>17</sup>	92.32	0.967
2	16	5.11 × 10 <sup>11</sup>	60.78	0.897	1.35 × 10 <sup>16</sup>	84.54	0.952
$V_m$		1.14 × 10 <sup>22</sup>	115.15	0.997	1.15 × 10 <sup>22</sup>	115.74	0.990

<sup>1)</sup>Arrhenius constant.

<sup>2)</sup>Activation energy (J/mol).



**Fig. 3. Effect of temperature on respiration rates under selected gas compositions.**

■ :  $V_m$ , ● : 20% O<sub>2</sub> + 0-1% CO<sub>2</sub>, ▲ : 15% O<sub>2</sub> + 4-6% CO<sub>2</sub>, □ : 10% O<sub>2</sub> + 8-10% CO<sub>2</sub>, ○ : 5% O<sub>2</sub> + 8-10% CO<sub>2</sub>, △ : 2% O<sub>2</sub> + 15-18% CO<sub>2</sub>.

호흡모델에서 보고한 결과와 같은 경향이였다. 0°C와 5°C에서  $K_m$ 은 0.1% 이하로 산소 소비가 이산화탄소 발생보다 높았으며,  $K_s$ 는 100% 이상이고 이산화탄소 발생이 산소 소비보다 높았다. 20°C에서 산소 소비와 이산화탄소 발생의  $K_m$ 은 각각 10.72%와 3.25%로 크게 증가하였고,  $K_s$ 는 각각 59.6%와 44.6%로 크게 감소하였다. 이로써 저온에서 산소와 이산화탄소 가스가 단감의 호흡에 미치는 영향이 아주 적으며, 온도가 증가할수록 그 영향력이 증가되고, 또한 산소농도의 감소에 따른 각 호흡량의 억제효과가 이산화탄소 발생보다 산소소비에서 더욱 큰 것을 알 수 있다. 이는 Kubo 등(33)이 flow system으로 조사한 결과와 일치하였다.

Table 4는 산소와 이산화탄소 각 가스 조건 및  $V_m$ 의 Arrhenius상수(A)와 활성화에너지(E)를 나타내었다.  $V_m$ 에서 A와 E는 1.14 × 10<sup>22</sup>와 115.15 J/mol로 가장 크고, 산소농도가 낮아지고 이산화탄소 농도가 높아질수록 모두 감소하는 경향이였다. 이는 Mahajan 등이(32) 사과에서  $V_m$  및  $K_m$ ,  $K_s$ 에 대하여 Arrhenius

식을 적용하여 온도에 대한 호흡모델을 보고한 것과 유사한 경향을 보였으며, Lakakul 등이(34) 사과에서 산소분압이 감소할수록 E값이 감소한다는 보고와 일치하나, Haggar 등이나(22) Song 등이(35) 몇 가지 가스조건에서 E값이 일치한다는 보고와는 다른 경향이였다. 특히 blueberry의  $V_m$ 은 Arrhenius plot에서 비선형이라는 주장과 달리 단감은  $V_m$ 값이 다른 가스조건보다 결정계수가 높게 조사되었다. 또한 산소소비의 A와 E가 이산화탄소 발생의 A와 E보다 낮은 경향이였다. 이는 이산화탄소 발생 호흡량이 산소소비 호흡량에 비해 온도의 영향을 많이 받는 것으로 예측할 수 있다. 따라서 0°C에서 RQ(respiratory quotient)가 평균 0.75 수준이었지만 20°C에서는 1.05 수준으로 증가 되었다.

Fig. 3은  $V_m$ 과 공기조성별 온도에 따른 호흡을 변화를 그래프로 나타내었다. 산소 감소와 이산화탄소 증가에 따른 호흡량 감소 효과는 Table 3에서 예측한 바와 같이 0°C와 5°C의 저온에 비해 20°C의 고온에서 크지는 경향이였고, 산소소비 호흡량이 이산화탄소 발생 호흡량보다 산소와 이산화탄소 가스의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 이는 Table 3에서 산소소비와 이산화탄소 발생의  $K_m$ 과  $K_s$ 값 비교에 의한 예측과 일치하는 결과이다.

**MA 포장내 공기변화 예측과 적용**

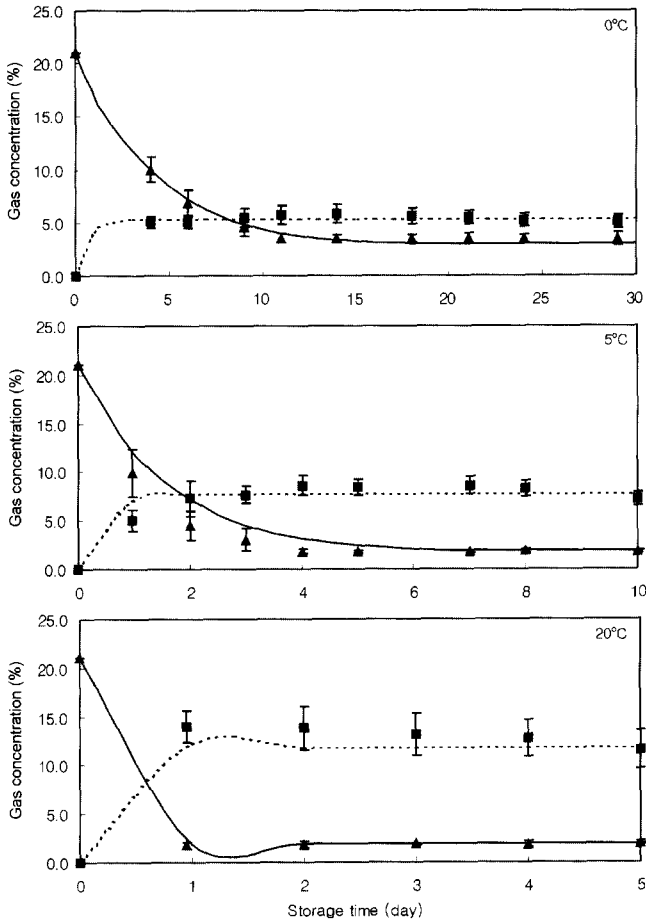
Fig. 4는 Table 3에서 예측한 단감의 호흡모델 parameter들과 식 9, 10을 사용하여 MA 포장내 공기조성의 변화를 예측한 값과 실제 실험으로 조사한 결과를 각 온도별로 나타내었다(36). 실험값과 예측값은 저장초기에 차이가 있었으나 대체로 일치하였다. 특히 정상상태(steady state)에 도달한 후 예측치는 실험값에서 반복간 편차가 있었으나 대체로 일치하였다.

$$\frac{[O_2]}{dt} = 100 \left\{ \frac{P_{O_2}(0.21 - [O_2]/100)}{V} - \frac{W \times R_{O_2}}{V} \right\} \quad (9)$$

$$\frac{[CO_2]}{dt} = 100 \left\{ \frac{P_{CO_2}(0.21 - [CO_2]/100)}{V} + \frac{W \times R_{CO_2}}{V} \right\} \quad (10)$$

여기서  $P_{O_2}$ 는 필름의 산소투과율(mL · m<sup>-2</sup> · hr<sup>-1</sup> · atm<sup>-1</sup>),  $P_{CO_2}$ 는 이산화탄소 투과율(mL · m<sup>-2</sup> · hr<sup>-1</sup> · atm<sup>-1</sup>)이다.

따라서 단감의 최적 MA 포장조건 설정에 있어서 온도와 가스조성에 대한 호흡모델로 다른 신선채소류들과 같이 효소반응속도론의 비경쟁억제 효소반응속도식이 타당한 것으로 판단된다. 결론적으로 가스조성과 저장온도가 단감의 호흡에 미치는 영향을 나타내기 위하여 효소반응속도론의 비경쟁억제 효소반응



**Fig. 4. Predicted package atmosphere and experimental data for permeable package of the persimmon fruits at 0, 5, and 20°C.** Package have 225 ± 5 g persimmon fruits with initial free volume of 120 mL, surface area of 0.0392 m<sup>2</sup>, and film thickness of 52 µm LDPE. Solid and dotted line represent predicted oxygen and carbon dioxide gas compositions, respectively. Triangles and squares are experimental oxygen and carbon dioxide gas compositions, respectively. Vertical bars indicate ± SD (n=10).

속도식과, Arrhenius 식을 각각 모델로 하여 호흡계수를 결정하였다. 호흡 data는 0, 5, 20°C에서 폐쇄계방법으로 수집되었다. 호흡모델의  $V_m$ 과  $K_m$ 은 온도가 올라갈수록 증가하는 경향이었고,  $K_i$ 는 감소하는 경향이였다. 0, 5°C의 저온에서  $K_m$ 은 0.1% 이하,  $K_i$ 는 100%이상이었고, 20°C 고온에서 산소소비와 이산화탄소 발생의  $K_m$ 은 각각 10.72%와 3.25%로 크게 증가하였고,  $K_i$ 는 각각 59.6%와 44.6%로 크게 감소하였다. 이는 저온에서 산소와 이산화탄소 가스가 단감의 호흡에 미치는 영향이 아주 적으며, 온도가 증가할수록 그 영향력이 증가되고, 또한 산소농도의 감소에 따른 각 호흡량의 억제효과가 이산화탄소 발생보다 산소소비에서 더욱 큰 것을 알 수 있다. 활성화에너지(E)는 산소 농도가 낮아지고 이산화탄소 농도가 높아질수록 모두 감소하였고, 산소소비의 E가 이산화탄소 발생의 E보다 낮은 경향이였다. 이는 이산화탄소 발생 호흡량이 산소소비 호흡량에 비해 온도의 영향을 많이 받는 것으로 예측할 수 있다. 또한 산소감소와 이산화탄소 증가에 따른 호흡량감소 효과는 저온에 비해 고온에서 커지는 경향이였고, 산소소비 호흡량이 이산화탄소 발생 호흡량보다 산소와 이산화탄소 가스의 영향을 많

이 받는 것으로 나타났다. 이는 산소소비와 이산화탄소 발생의  $K_m$ 과  $K_i$ 값 비교에 의한 예측과 일치하는 결과이다. 이상의 값을 근거로 한 포장 내 공기조성 변화의 예측과 실험값은 거의 일치하였다.

따라서 단감의 저장기간 연장 및 신선도 유지를 위한 최적 MA 포장조건 설정에 있어서 온도와 가스조성에 대한 호흡모델로 다른 신선채소류들과 같이 효소반응속도론의 비경쟁억제 반응속도식이 타당한 것으로 판단된다. 다만 저온에서  $K_i$ 값이 100%를 초과하는 것은 현실적으로 있을 수 없고 이는 이산화탄소가 단감의 호흡속도를 억제하는 효과가 적다고 판단할 수 있으므로 저온에서 단감의 호흡모델을 결정하는데 있어서 이산화탄소의 영향을 감안하지 않은 식 2의 Michaelis-Menten 효소반응속도식을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 재배조건 및 환경 등의 수확 전 관리방법과 저장 전처리 등에 따라서 호흡특성이 바뀔 수 있으므로 이에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다.

**요 약**

단감의 호흡에 미치는 산소, 이산화탄소 가스조성과 저장온도의 영향을 조사하기 위하여 비경쟁억제 효소반응속도식( $R = V_m [O_2] / (K_m + (1 + [CO_2] / K_i) [O_2])$ )과, Arrhenius 식( $R = A \exp(-E / (R^* T))$ )을 각각 모델로 하였다. 호흡 data는 0, 5, 20°C에서 폐쇄계방법으로 수집하였다. 0, 5°C에서  $K_m$ 은 0.1%이하,  $K_i$ 는 100% 이상이었고, 20°C에서 산소소비와 이산화탄소 발생의  $K_m$ 은 각각 10.72%와 3.25%로 크게 증가하였고,  $K_i$ 는 각각 59.6%와 44.6%로 크게 감소하였다. 활성화에너지는 산소농도가 낮아지고 이산화탄소 농도가 높아질수록 감소하였고, 산소소비의 활성화에너지가 이산화탄소 발생의 활성화에너지보다 낮았다. 이는 이산화탄소 발생 호흡량이 산소소비 호흡량에 비해 온도의 영향을 많이 받고, 산소감소와 이산화탄소 증가에 따른 호흡량 감소 효과는 저온에 비해 고온에서 커지는 경향이였다. 이는 산소소비와 이산화탄소 발생의  $K_m$ 과  $K_i$ 값 비교에 의한 예측과 일치하는 결과이다. 이상의 값을 근거로 하여 각 온도별 MA 포장 내 공기조성 변화의 예측하였고, 또한 실제 실험으로 조사된 값을 일치하였다. 따라서 단감의 최적 MA 포장조건설정에 있어서 효소반응속도론에 근거한 호흡모델이 타당한 것으로 판단되었다.

**문 헌**

1. Tarutani T. Studies on the storage of persimmon fruits. Memoirs Faculty Agric. Kagawa Univ. 19: 52-54 (1965)
2. Kim YS, Jeong SB, Son DS, Lee KK, Lee UJ. Studies on the causal factors of skin browning and its control method in non-astringent persimmon (*Diospyros kaki* Thunb). Korean R.D.A. Res. Rept. 31: 62-72 (1989).
3. Shin IS, Lee SK, Park YM. Factors involved in discoloration of non-astringent 'Fuyu' persimmon fruits. J. Korean Soc. Hort. Sci. 35: 155-164 (1994).
4. Ruth BA, Yohanan Z, Lillian S, Joshua K. Modified atmosphere packaging for long-term storage of astringent persimmons. Post-harvest Biol. Technol. 1: 169-179 (1991)
5. Ruth BA, Yohanan Z. Extending the storage life of 'Fuyu' persimmon by modified-atmosphere packaging. Hort. Sci. 27: 811-813 (1992)
6. Pesis E, Levi A, Ruth BA. Deastringency of persimmon fruits by creating a modified atmosphere in polyethylene bags. J. Food Sci. 51: 1014-1017 (1986)

7. Pesis E, Levi A, Ruth BA. Role of acetaldehyde production in the removal of astringency from persimmon fruits under-various modified atmospheres. *J. Food Sci.* 53: 153-156 (1988)
8. Ahn GH, Song WD, Park DS, Lee Y, Lee DS, Choi SJ. Package atmosphere and quality as affect by modified atmosphere conditions of persimmon (*Diospyros kaki*, cv. Fuyu) fruits. *Korean J. Food Sci. Technol.* 33: 200-204 (2001)
9. Lee YM, Kwon OC, Cho YS, Park YM, Lee YJ. Effects of oxygen and carbon dioxide concentration in PE film bag on blackening and flesh browning disorder MA storage of 'Fuyu' persimmon fruit. *J. Korean Soc. Hort. Sci.* 40: 585-590 (1999)
10. Lee YJ, Lee YM, Kwon OC, Jeong SJ, Lee YB, Cho YS, Park YM, Kim TC. Effects of fruit size and PE film area on skin blackening and flesh browning discoloration in MA storage of 'Fuyu' persimmon fruit. *J. Korean Soc. Hort. Sci.* 41: 71-74 (2000)
11. Lee YJ. Discoloration disorder as influenced by sealing methods of PE film bag in MAP Storage of 'Fuyu' persimmon fruit. *J. Korean Soc. Hort. Sci.* 42: 721-724 (2001)
12. MacRAE EA. Development of chilling injury in New Zealand grown 'Fuyu' persimmon during storage. *New Zealand J. Exp. Agric.* 15: 333-344 (1987)
13. Collins RJ, Tisdell S. The influence of storage time and temperature on chilling injury in Fuyu and Suruga persimmon (*Diospyros kaki* L.) grown in subtropical Australia. *Postharvest Biol. Technol.* 6: 149-157 (1995)
14. Ahn GH, Song WD, Choi SJ, Lee DS. The Association of post-storage physiological disorder incidence with respiration and ethylene production in 'Fuyu' persimmon fruits. *Korean J. Food Sci. Technol.* 36: 283-287 (2004)
15. R Nakano, E Ogura, Y Kubo, A Inaba. Ethylene biosynthesis in detached young persimmon fruit is initiated in calyx and modulated by water loss from the fruit. *Plant Physiol.* 131: 278-286 (2003)
16. Susana CF, Fernanda AR, Jeffrey KB. Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review. *J. Food Eng.* 52: 99-119 (2002)
17. Kader AA, Zagory D, Kerbel EL. Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. *CRC Critical Rev. Food Sci. Nutr.* 28: 1-30 (1989)
18. Yam KL, Lee DS. Design of modified atmosphere packaging for fresh produce. In: *Active Food Packaging*. Rooney ML (ed). Blackie Academic & Professional, London, UK. pp. 55-73 (1995)
19. Kader AA. Respiration of gas exchange in vegetables. In: *Post Harvest Physiology of Vegetables*, Weichmann J. (ed). Marcel Dekker, NY, USA (1987)
20. Ryall AL, Pentzer WT. Handling, Transportation and Storage of Fruits and Vegetables, Vol. 1. Vegetables and Melons. 2nd ed. AVI Publishing Co., Westport, CT, USA (1979)
21. Ryall, AL, Pentzer WT. Handling, Transportation and Storage of Fruits and Vegetables, Vol. 2. Fruits and Tree Nuts. 2nd ed. AVI Publishing Co., Westport, CT, USA (1982)
22. Lee DS, Hagggar PE, Lee J, Yam KL. Model for fresh produce respiration in modified atmospheres based on principles of enzyme kinetics. *J. Food Sci.* 56: 1580-1585 (1991)
23. Salvador ML, Jaime P, Oria F. Modeling of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> exchange dynamics in modified atmosphere packaging of burlat cherries. *J. Food Sci.* 67: 231-235 (2002)
24. McLaughlin CP, O'Beirne D. Respiration rate of a dry coleslaw mix as affected by storage temperature and respiratory gas concentrations. *J. Food Sci.* 64: 116-119 (1999)
25. Hagger PE, Lee DS, Yam KI. Application of an enzyme kinetics based respiration model to closed system experiments for fresh produce. *J. Food Pro. Eng.* 15: 143-157 (1992)
26. Mannapperuma JD, Singh RP. Modeling of gas exchange in polymeric packages of fresh fruits and vegetables. In: *Process Optimisation and Minimal Processing of Food*. Singh RP, Olivera F (eds). Elsevier, NY, USA (1992)
27. Lee J. The design of controlled or modified packaging systems for fresh produce. In: *Food Product-Package Compatibility*. Gray JI, Harte BR, Miltz J (eds). Technomic Publishing Co., Lancaster, PA, USA (1987)
28. Fishman S, Rodov V, Peretz J, Ben-Yehoshua S. Model for gas exchange dynamics in modified-atmosphere packages of fruits and vegetables. *J. Food Sci.* 60: 1078-1083 (1999)
29. Karel M, Issenberg P, Ronsivalli L, Jurin V. Application of gas chromatography to the measurement of gas permeability of packaging materials. *Food Technol.* 17: 91-94 (1963)
30. Henig YS, Gilbert SG. Computer analysis of the variables affecting respiration and quality of produce packaged in polymeric films. *J. Food Sci.* 40: 1033-1035 (1975)
31. Gong S, Corey KA. Predicting steady-state oxygen concentrations in modified-atmosphere packages of tomatoes. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 119: 546-550 (1994)
32. Mahajan PV, Goswami TK. Enzyme kinetics based modelling of respiration rate for apple. *J. Agric. Eng. Res.* 79: 399-406 (2001)
33. Kubo Y, Inaba A, Nakamura R. Extinction point and critical oxygen concentration in various fruits and vegetables. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 65: 397-402 (1996)
34. Lakakul R, Beaudry RM, Hernandez RJ. Modeling respiration of apple slices in modified-atmosphere packages. *J. Food Sci.* 64: 105-110 (1999)
35. Song YS, Kim HK, YamKL. Respiration rate of blueberry in modified atmosphere at various temperatures. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 117: 925-929 (1992)
36. Hayakawa K, Henig YS, Gilbert SG. Formulae for predicting gas exchange of fresh produce in polymeric film package. *J. Food Sci.* 40: 186-191 (1975)

---

(2004년 5월 8일 접수; 2004년 6월 20일 채택)