

CATTS를 이용한 복숭아순나방 사과 수확 후 방제 기술

정충렬 · 권기면¹ · 김용균*

안동대학교 생명자원과학과, ¹생물이용연구소

A Postharvest Control Technique of the Oriental Fruit Moth, *Grapholita molesta*, Infesting Apples Using CATTS

Chongryul Jung, Kimyeon Kwon¹ and Yonggyun Kim*

Department of Bioresource Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea

¹Bio Utilization Institute, Songchun, Andong 760-380, Korea

ABSTRACT: Postharvest insect pest control is necessary for agricultural industry including domestic consumer markets and exporting products to meet quarantine issue. Especially, the organic or environmentally friendly agricultural products do not fit to the traditional chemical postharvest treatments mostly using methyl bromide. As an alternative, a physical treatment called CATTS (controlled atmosphere and temperature treatment) has been developed to control various insect and mite pests on apple and several stone fruits. This study was designed to determine the CATTS conditions to control the oriental fruit moth, *Grapholita molesta*, which is restricted in exporting the infested apples. To apply CATTS on this insect pest, the most heat-tolerant stage was determined. Among the immature stages locating on the fruits, the fifth instar larvae were the most tolerant to 44°C for 20 min. The ramping rate (the time to increase chamber temperature from 25°C to 46°C) was positively correlated with the CATTS efficiency under 15% CO₂ and 1% O₂. After the ramping step, the duration of CATTS was positively correlated with CATTS efficiency. In addition, the CATTS efficiency was highly dependent on the fruit internal temperature at 44°C. From all these parameters, we developed a standard protocol yielding 100% control efficiency of CATTS against apples infested by 4,378 larvae including 2,104 fifth instar individuals.

Key words: CATTS, Postharvest control, *Grapholita molesta*, Apple

초록: 수확 후 해충방제가 국내 수요 농산물은 물론이고 검역 문제를 해결하기 위한 수출용 농산물에 대해서 요구되고 있다. 특별히 유기 농산물 또는 환경친화형 재배 농산물에 대해서 메틸브로마이드와 같은 화합물을 이용한 기존의 수확 후 처리기술은 의미를 잃게 되었다. 대체 기술로서 CATTS (환경조절열처리기술)라 명명된 물리적 처리기술이 개발되어 사과와 여러 핵과류 과실을 가해하는 곤충과 응애에 적용되고 있다. 본 연구는 국내 사과 수출을 위해 수입국에서 규제하는 복숭아순나방(*Grapholita molesta*)을 대상으로 CATTS 처리 조건을 결정하는 데 목표를 두었다. 이 해충에 CATTS를 적용하기 위해 사과 과실에 잔류하면서 열에 높은 내성을 보이는 발육시기를 분석하였다. 열처리 조건(44°C, 20분)에서 5령 유충이 가장 높은 내성을 보였다. 환경조건(15% CO₂, 1% O₂)에서 기기 내부 온도가 25°C에서 46°C까지 증가하는 시기를 CATTS 가열단계로 볼 때, 이 가열 속도가 빠를수록 CATTS 해충 방제 효과가 높았다. 또한 가열단계 후 CATTS 처리 시간이 길수록 CATTS 효율이 증가했다. 특히 가열단계에서 과실 내부온도가 44°C로 이르게 하는 것이 CATTS 효율을 높이는 데 결정적이었다. 이러한 조건들을 종합하여 CATTS 표준 처리기술을 결정하였으며, 이 기술은 2,104 마리의 5령을 포함한 4,378 마리 복숭아순나방 유충 피해를 받은 사과에 대해서 100% 방제 효과를 나타냈다.

검색어: 환경조절열처리기술, 수확 후 방제, 복숭아순나방, 사과

수확 후 해충 방제 기술은 농산물의 수확 후 소비자에게 이르기까지의 해충군 관리로 정의되며, 저장농산물과 수출입 검역농산물에 대한 해충 방제를 포함하게 된다(Follett and Neven, 2006). 특별히 검역 해충의 문제는 농산물의 국제 교역량이 늘

*Corresponding author: hosanna@andong.ac.kr

Received October 14 2013; Revised January 7 2014

Accepted January 20 2014

어나면서 크게 우려되고 있다. 즉, 새로운 해충의 정착은 토착 농작물 피해로 이어지면서 이에 따른 방제 비용의 증가가 수반되면서 막대한 경제적 피해를 일으키고 있다. 미국의 경우 이러한 외래 해충에 의한 피해가 연간 170억불 이상에 이른다고 보고하였다(Pimentel et al., 2002). 자연히 이러한 해충의 침입을 억제시키려는 방역기술의 개발과 현장 적용이 요구되고 있다.

방역기술은 크게 화학적 및 물리적 처리법으로 대별된다(Paull and Armstrong, 1994; Sharp and Hallman, 1994). 화학적 처리법은 메틸브로마이드나 포스핀과 같이 농작물 심층부까지 침투하여 효과를 발휘하는 훈증 처리와 표면에 정착하는 해충을 제거하는 비누화물질 또는 화학농약 처리를 포함한다. 반면에 물리적 처리법은 온도(고온, 저온)처리, 환경조절처리, 방사선 처리 및 이들의 혼합처리를 포함한다. 온도 처리는 해충의 온도에 대한 생존 한계 범위를 이용한 방제 기술이고, 환경조절처리는 높은 농도의 이산화탄소와 낮은 농도의 산소를 결부한 온도 처리를 의미한다(Carpenter and Potter, 1994; Neven and Drake, 2000). 방사선 조사는 해충의 DNA의 화학결합을 붕괴시킴으로 소독효과를 발휘하게 한다. 기타 물리적 처리법으로 오존처리(Hollingsworth and Armstrong, 2005; Kells et al., 2001), 마이크로파처리(Ikedia et al., 1999), 라디오파열처리(Nelson, 1996; Tang et al., 2000; Wang et al., 2002), 고압산소처리(Butz and Tauscher, 1995) 및 진공처리(Liu, 2003)를 포함하게 된다.

물리적 처리기술 가운데 환경조절열처리는 일명 CATTS (controlled atmosphere temperature treatment system)로 불리는 데, 높은 농도의 이산화탄소와 낮은 농도의 산소 환경 조건에서 특정 해충의 생존 한계에 해당하는 고온을 처리하면서 방역효과를 극대화하는 기술이다(Neven and Mitcham, 1996). 다양한 과실 해충에 대해서 수확 후 소독 기술로 검증되었고 화학소독 처리의 대체 방법으로 제기되고 있다(Neven, 2008a). 이 처리 기술의 살충 원리는 근본적으로 고온에 따른 대사 억제로서 높은 CO₂ 농도와 낮은 O₂ 농도를 가미하여 고온 스트레스에 대한 곤충의 회복 능력을 상실하게 함으로서 최적 방제 효과를 피하게 된다. 반면 작물체의 경우는 주로 열대 또는 아열대 지역에서 재배되는 식물이 열에 대한 내성을 지니고 있기 때문에 CATTS 처리 대상이 된다. 또한 CATTS를 처리할 경우 재배 환경 때 일어나는 가열 속도(선선한 아침 기온에서 정오 무렵 최고 온도에 이르는 온도 변화)에 맞추어 CATTS 가열단계를 가져가면 고온에 따른 과실 피해를 막을 수 있다(Neven et al., 2001; Obenland et al., 2005). 여기에 수확 후 과실과 곤충의 근본적 생리가 혐기조건의 대사로서 일반적으로 식물은 CATTS 상태에서 일어나는 낮은 산소 조건에서 유발되는 무산소 상태에서 대사가 가능하나 곤충은 이러한 무산소 상태에서 대사가

불가능하여 차별적 치사효과를 줄 수 있다(Neven, 2008b).

CATTS 소독 기술은 다른 유사 물리적 방제 기술에 비해 우수한 것으로 보고되고 있다. 예로서 또 다른 물리적 방제 기술인 고압처리기술(high pressure processing: HPP)이 과실을 가해하는 해충에 대해 검토되었다(Neven et al., 2007). 일반적으로 HPP는 식품위생균이나 부패균을 소독하기 위해 약 85,000~90,000 pounds per inch² (psi)의 고압으로 처리한다(Torres and Velazquez, 2005). 코들링나방의 경우 알 발육태가 가장 감수성이 낮아 30,000~80,000 psi에서 완전 소독이 이뤄지며, 과실파리류는 25,000 psi 이상이면 모든 발육태에서 방제효과를 얻게 된다(Neven et al., 2007). 그러나 이들 해충이 가해하는 사과나 체리에 약해를 일으켜서 수확 후 소독 기술로 적용하기에는 문제가 있다.

국내에서 CATTS 해충 방제 기술은 사과를 중심으로 복숭아 심식나방과 벚나무응애에 대해서 적용되었다(Son et al., 2012a,b). 특별히 사과 과실 내부를 가해하며 외국에 사과를 수출할 경우 검역 대상에 오른 해충은 복숭아심식나방(*Carposina sasakii*), 복숭아명나방(*Conogethes punctiferalis*) 그리고 복숭아순나방(*Grapholita molesta*)을 포함하고 있다. 최근 복숭아순나방붙이(*G. dimorpha*)가 보고되고, 이들의 사과 내부 가해가 알려져 사과 심식충의 종수를 늘고 있다(Choi et al., 2009; Jung and Kim, 2011). 따라서 사과에 대해 안전농산물을 확보하기 위한 수확 후 해충 방제기술을 확립하기 위해서는 이들 심식충 모두에 대한 CATTS 적용 기술을 개발해야 한다.

복숭아순나방은 연중 4~5회 성충 발생 피크를 보이며 유충은 사과나 배 등 핵과류의 과실을 직접 가해하는 일차해충이다(Ahn et al., 1985). 사과의 경우 과실에 직접피해를 주는 심식류 가운데 복숭아순나방은 가장 높은 밀도로 발생하여 최대 경제적 손실을 끼치는 주요 해충으로 여겨지고 있다(Song et al., 2007). 사과 재배 기간 중에 주로 이 해충은 화학 농약 살포에 의해 방제를 피하는 데, 피해를 주는 발육단계인 유충이 과실 내부에서 가해하고 서식하기 때문에 살충제의 직접 접촉이 어렵고, 이에 따른 다량의 화학농약 살포는 약제 저항성까지 발달시킬 수 있다는 보고가 있어 방제의 어려움을 가중시키고 있다(Pree et al., 1998; Kanga et al., 2001; Usmani and Shearer, 2001). 이에 따라 수확 후에도 사과 과실에 미성숙단계의 복숭아순나방 개체들이 잔류하여 국내 시장에서 상품성을 떨어뜨리고, 국외로 수출하는 경우 대상국들의 주요 검역 대상 해충이 되어 왔다. 소독 방법으로는 메틸브로마이드 처리가 있으나, 이는 오존층 파괴물질로서 점차 사용이 금지될 전망이며, 약해 피해로 인해 수출용 과실에 사용하기는 부적합하므로(NOP, 2007), 약해 발생 없으며 친환경적인 소독기법 개발이 요구되고 있다.

본 연구는 사과 수확 후 친환경 방제 기술로서 복숭아순나방에 대해서 CATTS를 적용하려 했다. 이를 위해 사과 과실에 노출될 수 있는 복숭아순나방 발육시기 가운데 가장 열에 대한 내성이 높은 발육 시기를 결정하였으며, 이 발육시기를 대상으로 CATTS 방제 기술을 개발하였다. CATTS 방제 기술은 기존의 복숭아순나방 방제 사용했던 조건(Son et al., 2012a)을 바탕으로 가열조건과 CATTS 처리 시간을 조정하였다.

재료 및 방법

공시충 채집 및 사육

복숭아순나방은 경북지역 사과원에 발생하는 과실로부터 채집하였으며, 밀배아를 기본 영양원으로 개발된 코들링나방 인공사료(Toba and Howell, 1991)를 이용하여 사육하여 실내 발육시기별 열 내성 변이의 생물검정 분석에 이용하였다. CATTS 처리 효과는 경북 지역 사과원에서 수거된 피해 사과를 대상으로 이뤄졌다.

발육시기별 열처리 내성 변이 분석

각 1.5 ml 튜브에 실험하고자 하는 발육태를 한 마리씩 넣었

다. 각 곤충을 44°C 항온수조에서 20 분 동안 노출시킨 후 곤충 사육 페트리디쉬(직경 50 mm × 두께 15 mm)에 먹이와 함께 넣어 24시간 후에 생존 여부를 확인하였다. 치사된 곤충은 먹이를 먹지 않고 있거나 움직임이 없는 개체로 판단하였다. 번데기의 경우는 핀셋으로 흉부를 잡아 움직임이 없는 개체를 치사충으로 판별하였다.

CATTS 처리 기기

본 연구에 사용된 CATTS 기기는 기존의 소형기기(Son et al., 2010)를 개량하여 제작되었다. 제작된 CATTS 기기는 자동환경조절(산소, 이산화탄소, 온도)이 컴퓨터 프로그램(Microsoft visual Studio, Microsoft, Redmond, WA, USA)으로 제어되는 중형 본체(1,229 L)로 구축하였다. 본체는 삼원테크(Jungwang, Kyunggi, Korea)에서 제작하였고, 질소 가스는 파일럿식 5 웨이, 이산화탄소 가스는 파일럿식 2 웨이 솔레노이드 밸브 가스 조절기 고압용 솔레노이드밸브 가스 조절기(VPW214, 두진밸브, Seoul, Korea)로 본체에 연결되었다. CATTS 본체의 온도는 25°C 에서 46°C 까지 상승시키는 데 다양한 속도로 조정되도록 제작되었다. 내부의 가스 농도와 온도의 순환을 돕기 위해 기기 좌, 우에 고압 환풍기(520 m³/h, TFP~F20 AS, LGA, Fanzic, Hwasung, Kyunggi, Korea)를 각각 4 개

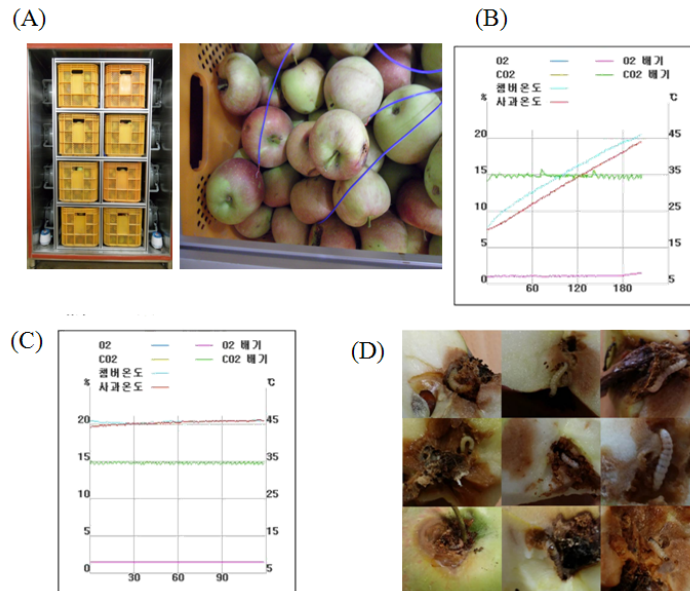


Fig. 1. CATTS treatment. (A) Loading apples infested by *Grapholita molesta* larvae and installing the thermal sensors to chamber and fruits. (B) Dashboard of CO₂, O₂, and temperatures in CATTS chamber during ramping period. See the increase of both chamber and fruit temperatures while CO₂ and O₂ keep 15% and 1% levels, respectively. (C) Dashboard of CO₂, O₂, and temperatures in CATTS chamber during ramping period. See the increase of both chamber and fruit temperatures while CO₂ and O₂ keep 15% and 1% levels, respectively. (D) Dead *G. molesta* larvae in the apple fruits after CATTS treatment.

씩 부착하였다. 산소 1%와 이산화탄소 15%의 농도를 유지하도록 자동환경조절 장치를 구축하였다. 온도 확인을 위해 Thermocouple wire (GG-K-20-SLE, Omega, USA)를 이용하여 본체 온도와 과실 내부의 온도를 확인하였다.

CATTS 처리 방법

매 처리 전 질소를 20분 동안 투입하여 CATTS 기기 내 산소 농도를 1%로 낮추었다(Fig. 1). 이후 질소를 투입하면서 이산화탄소 밸브를 열고 자동으로 농도가 15%에 이르도록 설정하였다. 실내 온도(25°C)에서 목표 온도(46°C)까지 기기내부 온도가 증가하는 가열단계(ramping stage) 이후 CATTS 시간을 2 시간으로 설정하였다. 그러나 실험 목적에 따라 CATTS 노출 시간은 상이하게 조정하였다. 처리 시간별 사용된 사과 무게는 15 kg이며, 여기에 가해하고 있는 복숭아순나방의 수는 각 처리시간별로 30 마리 이상이였다.

Table 1. Susceptibilities of different developmental stages of *Grapholita molesta* to a heat treatment (44°C for 20 min)

Developmental stage	Head capsule (mm)	N	Dead	Mortality (%) ¹
Larvae				
1st instar	0.24±0.012	30	30	100.0
2nd instar	0.52±0.031	28	26	92.9
3rd instar	0.73±0.033	36	27	75.0
4th instar	0.90±0.037	34	12	35.3
5th instar	1.05±0.056	34	9	26.5
Pupae	-	30	11	36.7

¹Statistic among all stages: $X^2 = 67.29$, $df = 5$, $P < 0.0001$

결과

열 내성 복숭아순나방 발육시기 결정

수확 후 저장기간에 사과 과실에 존재할 수 있는 복숭아순나방 발육시기 가운데 열에 대한 내성이 가장 큰 시기를 결정하여 이 발육시기를 대상으로 CATTS 효과를 분석해야 했다. 이를 위해 상이한 유충 발육시기 및 번데기를 대상으로 열 감수성 조사를 실시하였다(Table 1). 알의 경우 기존의 연구에서 유충에 비해 현격히 낮은 열 내성을 보여(Neven and Rehfield-Ray, 2006a) 본 연구에서 제외시켰고, 이전 연구에서 분석이 되지 않았지만 과실에 함께 존재할 수 있는 번데기 시기를 분석에 포함시켰다. 추후 CATTS에서 내부의 온도를 44°C를 설정하여 처리하기에 이 온도를 기준으로 20분간 노출시켜 열 내성을 분석한 결과 5 단계의 유충과 번데기의 상이한 발육시기 사이에 뚜렷한 차이를 나타냈다. 이 가운데 가장 내성이 높은 유충 시기는 5령 시기였으나, 4령과 통계적 차이를 나타내지 않았다($X^2 = 0.62$; $df = 1$; $P = 0.4310$). 그러나 추후 CATTS 처리 분석에서는 5령을 중심으로 진행하였다.

과실 내부 복숭아순나방 처리 CATTS 조건 결정

CATTS 처리는 크게 두 단계로 초기 가열단계와 이후 고온 유지 처리시기로 나뉜다. 초기 가열 단계('ramping')의 속도에 따라 복숭아순나방 5령에 대한 살충률 변동에 대해서 분석했다(Table 2). 이때 CATTS 기기 내부 온도를 기준으로 초기 가열 속도를 설정하였으며, 이후 CATTS 처리는 2 시간을 적용하였다. 이때 초기 가열 속도를 빠르게 할수록 살충효과가 증가했다. 초기 가열단계 이후 CATTS 고온 처리를 유지하는 기간에

Table 2. Control efficacies of different ramping periods of CATTS on postharvest treatment of apple fruits infested by *Grapholita molesta* (one box treatment per CATTS chamber)

No. of treated apples	Chamber ramping ¹ (hour:min)	No. of larvae observed after CATTS treatment ²			Mortality (%)
		Total	Dead	Alive	
221	1:30	150	150	0	100±0.0
382	2:15	288	272	16	95.2±9.5
359	2:35	309	275	34	89.4±8.4
394	3:30	274	245	29	88.2±14.0
540	3:43	540	467	73	84.9±14.4
960	4:07	727	611	116	83.8±9.1

¹Chamber ramping stage represents the period of the temperature change of CATTS chamber from 25°C to 44°C.

²CATTS treatment lasted for 2 h after the ramping stage under 15% CO₂ and 1% O₂.

따라 복숭아순나방의 살충력에 주는 효과를 분석했다(Fig. 2). 고온 유지 기간이 길어짐에 따라 살충 효과는 뚜렷이 증가했다($X^2 = 262.67$; $df = 2$; $P < 0.0001$).

사과 내부에 존재하는 복숭아순나방의 경우 사과 내부의 온도가 44°C로 이른 후 CATTs 고온 처리 시간이 유효하다. 그러나 CATTs 기기 내부에 처리 사과 적재량이 많아질 경우 기기 내부의 온도증가에 따라 사과 내부로 열 전도효율에서 차이를 나타낼 수 있다. 이를 분석하기 위해 최대 8개 사과 상자가 들어가는 CATTs 기기에 상이한 개수로 채워 넣고 사과내부 온도가 44°C에 이르는 데 까지 소요되는 시간을 측정했다(Fig. 3). 기기의 최대 가온 조건에서 사과 상자 적재량이 증가할수록 사과 내부의 가온 시간은 현격하게 차이를 나타냈다($F = 14.95$; $df = 1, 6$; $P = 0.0083$).

복숭아순나방에 대한 CATTs 처리 효과 검증

이상의 CATTs 처리 조건에 대한 결과를 토대로 초기 가열 기간은 사과내부온도가 44°C에 이르는 기간까지를 설정하였다. 처리 사과 상자 개수에 따라 78~220 분으로 다양했다. 이 조건에서 고온 처리 시간을 2 시간으로 설정했다. 기기 내부의 공기 조건은 15% CO₂와 1% O₂ 조건을 초기 가열과 고온 유지 시기 모두에 적용했다. 이 조건에서 전체 4,378 마리의 사과 내부에 서식하는 복숭아순나방에 대해서 100% 살충효과를 나타냈다(Table 3). 대부분은 3~5령의 시기였으며, 이 가운데 48.1%인 2,104 마리가 5령충으로 기록되었다. 그러나 나머지의 약 50% 이상이 4령인 것을 감안하면, 4~5령이 전체 처리 개체 가운데 약 3,200 마리 이상을 차지할 것으로 추정되었다.

고찰

수확 후 해충 방제 기술로서 CATTs 처리 기술은 국내에서는 사과를 대상으로 가해하는 복숭아심식나방과 뱃나무응애에

대해서 개발되었다(Son et al., 2012a,b). 본 연구는 CATTs 처리가 과실 내부를 가해하는 또 다른 주요 심식류 해충인 복숭아순나방에게도 적용될 수 있는 기술이라는 것을 입증하였다. 우

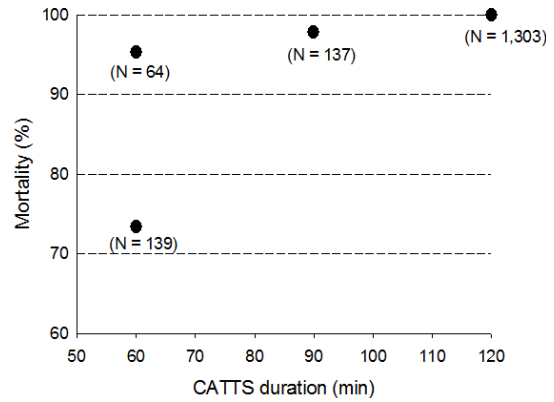


Fig. 2. Effect of different CATTs treatment periods on mortality of *Grapholita molesta* fifth instar larvae. CATTs treatment was conducted after the ramping period to reach the internal fruit temperature to 44°C. CA conditions used 15% CO₂ and 1% O₂. The figures in the parentheses indicate the test insect numbers.

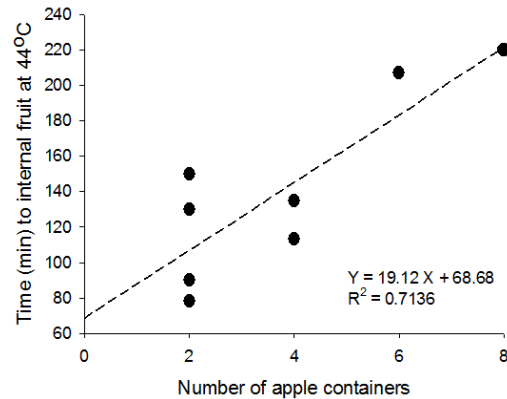


Fig. 3. Variation of the ramping period to reach the internal fruit temperature to 44°C according to the amount of the loading apples. The chamber has the maximum capacity of eight apple containers.

Table 3. Confirmation test of CATTs¹ efficiency against 5th instar larvae of *Grapholita molesta*

Heating rate (°C/h) ²	Final chamber temp (°C)	Total maximum treatment time (min) ³	Final fruit core temp (°C)	No. of total larvae (5th larvae only)	Control efficiency (%) ⁴
7	46	350	44	4,378 (2,104)	100

¹After the internal fruit temperature increased from 25°C to 44°C during ramping stage (75-220 min), CATTs treatment lasted for 2 h under 15% CO₂ and 1% O₂.

²Rate of temperature increase at the fruit core from 25°C to 44°C

³Total treatment time from initial increase in fruit core temperature (from 25°C to 44°C) until the termination of CATTs treatment

⁴Mortality was assessed at 24 h in 25°C after CATTs treatment.

선 이 기술을 응용하기 위해 복숭아순나방 유충 및 번데기를 대상으로 가장 열에 내성을 보이는 발육단계를 결정하였다. 미성숙 단계 가운데 알을 분석에서 제외시킨 이유는 동일한 복숭아순나방의 열 감수성 분석에서 알과 유충을 비교하였을 때 알이 현격하게 낮은 열 내성을 보였기 때문이다(Neven and Rehfield-Ray, 2006a). 그러나 기존의 연구는 복숭아순나방 5령에 대해서 그리고 번데기에 대해서 분석이 결여되었다. 이에 본 연구에서는 상대적 비교를 전 유충 발육태와 번데기를 상호 비교하였다. 결과적으로 5령 유충이 가장 열에 대한 내성이 높은 것으로 밝혀졌다. 이는 기존의 연구에서 가장 최종 분석 단계인 4령이 가장 높은 내성을 보인다는 점에서 복숭아순나방 유충기가 진행함에 따라 열에 대한 내성이 높아진다는 것의 의미였다. 그러나 번데기의 경우는 4, 5령에 비해 낮은 열 내성을 보였다. 유사한 결과가 복숭아심식나방에서도 나타나 최종 유충 발육태가 가장 높은 내성을 보였다(Son et al., 2012a). 따라서 복숭아순나방에 대한 CATTs의 방제 효과는 열의 내성이 가장 높은 5령을 주목표로 방제 효과를 분석해야 했다.

CATTs 처리 조건을 결정하기 위해 먼저 가열단계의 속도에 대한 방제 효율 평가가 실시되었다. 예상대로 가열단계의 가열 속도가 빨라질수록 방제 효율은 증가했다. 열충격에 대한 곤충의 피해는 독성 물질의 축적(Hoffman, 1985), 대부분 단백질 및 DNA 합성 정지(Koval, 1994), 생체막 파괴(Chapman, 1967), 단백질 변성(Hochachka and Somero, 1984) 그리고 내부 CO₂ 증가(Nikam and Khole, 1989)로 밝혀졌다. 가열속도가 느려짐에 따라 곤충이 고온에 대한 적응력을 가지면서 CATTs 방제 효과는 떨어지게 되었다(Neven and Rehfield, 1995; Neven et al., 1996). 이러한 적응력에는 곤충이 열 스트레스에 반응하여 생성하는 열충격단백질(heat shock protein: Hsp)이 관여했을 것으로 추정된다. 일반적으로 곤충의 경우도 열충격에 따라 형성되는 열충격단백질이 이러한 스트레스 회복에 관여하게 되는 데(Yin et al., 2006), CATTs의 낮은 산소 조건은 이러한 열충격단백질의 합성을 억제하는 것으로 해석된다. 유사한 해충인 복숭아심식나방의 경우 CATTs 처리는 열충격단백질 유전자 *Hsp90* 발현을 억제하는 것으로 밝혀졌다(Son et al., 2012a). 복숭아순나방의 열충격단백질 유전자(*Hsp70*과 *Hsp90*)가 최근에 밝혀졌고, 이들이 44°C에서 발현되었다(Chen et al., 2013). 비록 두 유전자가 여러 CATTs 처리 온도에서 발현되지만, 이들 가운데 어떤 단백질이 열내성에 관여하는지는 추후 밝혀져야 한다.

가열단계 이후 진행되는 CATTs 처리단계에서도 처리 시간이 증가함에 따라 방제 효과는 높아졌다. 앞에서 기술한 고온 스트레스를 극대화하기 위해 CATTs는 높은 이산화탄소 및 낮은

산소의 조건을 주게 된다. 두 가스 조건은 모두 생체의 산화적인 산화 반응을 억제하여 전체적으로 ATP 합성을 억제한다는 측면에서 동일한 스트레스를 주게 된다. 그러나 낮은 산소의 경우에는 전자전달계의 최종 수용체를 제공하지 않는 측면에서 영향을 주지만, 높은 이산화탄소 조건은 TCA 회로에 관여하는 succinate dehydrogenase (Edwards, 1968) 및 malate dehydrogenase (Fleurat-Lessard, 1990)을 억제한다는 측면에서 차이를 주고 있다. 여기에 높은 농도의 이산화탄소 조건은 생체로 하여금 ATP 사용량을 증가시켜 제한된 생체 ATP의 고갈을 빠르게 유도하여 차사 효과를 극대화한다(Neven and Hansen, 2010).

복숭아순나방에 대한 CATTs의 방제 효과는 미국의 선행 연구에서 개발되었으나, 본 연구에서 결정한 처리 조건과 차이를 보였다. 복숭아순나방과 더불어 사과와 복숭아류에 대해서 코들링나방(*Cydia pomonella*)에 대한 CATTs 수확 후 해충 방제 효과가 입증되었다. 이때 본 연구에서와 동일한 46°C의 처리 온도에서 과실 내부가 약 44°C 이상으로 30분간(12°C/h 온도 증가 속도) 또는 15분간(24°C/h 온도 증가 속도) 유지하며 100% 소독 효과를 보였다(Neven et al., 2006; Neven and Rehfield-Ray, 2006b). 유사한 CATTs 기술이 체리 과실을 가해하는 과실파리류(*Rhagoletis indifferens*)에서도 그 실효성이 입증되었다(Neven and Rehfield-Ray, 2006a). 본 연구에서도 과실의 내부 온도가 44°C에 이르러야 완전 방제 효과를 기대할 수 있었다. 그러나 이 이후에 CATTs 처리시간에서 현격한 차이를 보였다. 미국의 경우 30분 이내의 노출 시간인 반면 본 연구에서는 복숭아순나방의 완전 소독 효과를 주기 위해서는 120분의 CATTs 노출 시간을 요구했다. 근본적으로 기기의 공기순환 장치에서 차이로 사과 내부로 열전도 효율에서 차이점을 들 수 있다. 이에 따라 가열단계에서도 장시간이 소요되어 곤충으로 하여금 열충격에 대한 적응력을 갖게 하여 이후 CATTs의 노출시간이 길어진 것으로 해석된다. 따라서 국내에서 제작된 CATTs 기기가 공기 순환 및 이에 따른 사과 내부로 열전도 효율에서 미흡하다는 것을 의미했다. 추후 기기 내부 온도가 더 빨리 사과 내부의 온도 변화를 유도하도록 기기 내 공기 순환 방식을 변형시킬 필요가 있다. 비록 상이한 CATTs 조건이지만, 본 연구에서 결정된 조건을 정리하면, 환경 조건은 15°C CO₂, 1% O₂에서 가열단계는 사과 내부온도가 44°C에 이르는 기간으로 설정하고, 이 이후에 CATTs 노출을 2 시간으로 결정하였다. 이 CATTs 표준 조건에서 2,104 마리의 5령을 포함한 4,378 마리 복숭아순나방 유충 피해를 받은 사과에 대해서 100% 방제 효과를 나타냈다.

CATTs 기술을 국내에서 생산되는 사과에 대해서 적용하기 위해서는 국내산 사과에 대한 CATTs 처리에 대한 과실 피해

분석이 이뤄져야 한다. 그러나 이에 대한 결과는 희망적이다. 왜냐하면 기존 외국 연구에 의하면 CATTS 조건(온도 변화 속도: 12°C/h, 최종 온도: 44 또는 46°C)은 과실 피해가 없고 오히려 무처리 조건의 사과에 비해 사과 견실도를 높이고 저장 기간을 증가시켜, Golden Delicious 품종은 그을음병 증세가 무처리에 비해 낮아지고, Granny Smith 품종은 저장병 발생이 줄었다(Neven et al., 2001). 즉, CATTS 처리는 오히려 사과의 후성 속 속도를 늦추어 저장기간을 늘리고 과실 표면에 존재한 오염원의 소독 효과도 있는 것으로 이해되고 있다. 그러나 상이한 국내 사과 품종에 대해서 CATTS의 처리에 따른 과실 피해 유무는 검토되어야 할 주요 연구 항목이다. 또 다른 검토사항은 CATTS 처리 비용 문제이다. CATTS 처리를 위해서는 산소 농도를 1% 미만으로 줄이기 위해 다량의 질소 가스가 소비된다. 이에 반해 이산화탄소 가스는 사과 자체의 호흡에 따라 생산되는 것도 있어 무시할 수 있다. 높은 질소 가스 비용에 대한 해결책으로 CATTS 처리 장치의 대량화 및 기기내부의 빈공간을 줄이는 세부 처리 기술을 고려해 볼 수 있다. 즉, 처리될 사과가 CATTS 기기 내부를 채워주어 빈 공간을 줄임으로 가스로 대체할 공간을 줄여주는 경제적 처리 기술이다. 물론 이러한 대량화는 앞에서 언급한 바와 같이 높은 효율의 열전도 기술 개발이 수반되어야 가능하다. 향후 이러한 기기 사용자 측면의 현실적 세부기술들이 추가로 개발되어야 한다.

사 사

본 연구는 2013년도 동식물검역검사본부의 외부용역과제로 수행되었다.

Literature Cited

- Ahn, S.B., Koh, H.W., Lee, Y.I., 1985. Study on apple pests and natural enemy. Res. Rept. RDA. Crop Protection pp. 417-428.
- Butz, P., Tauscher, B., 1995. Inactivation of fruit fly eggs by high pressure treatment. J. Food Process. Preserv. 19, 161-164.
- Carpenter, A., Potter, M., 1994. Controlled atmospheres, in: Sharp, J.L., Hallman, G.J. (Eds.), Quarantine treatments for pests and food plants. Westview, Boulder, CO., pp. 171-198.
- Chapman, D., 1967. The effect of heat on membrane and membrane constituents, in: Rose, A.H., (Ed.), Thermobiology. Academic, NY. pp. 123-146.
- Chen, H., Xu, X.L., Li, Y.P., Wu, J.X., 2013. Characterization of heat shock protein 90, 70 and their transcriptional expression patterns on high temperature in adult of *Grapholita molesta* (Busck). Insect Sci. doi: 10.1111/1744-7917.
- Choi, K.H., Lee, D.H., Byun, B.K., Mochizuki, F., 2009. Occurrence of *Grapholita dimorpha* Komai (Lepidoptera: Tortricidae), a new insect pest in apple orchards of Korea. Kor. J. Appl. Entomol. 48, 417-421.
- Edwards, L.J., 1968. Carbon dioxide anaesthesia and succinic dehydrogenase in the corn earworm, *Heliothis zea*. J. Insect Physiol. 14, 1045-1048.
- Fleurat-Lessard, F., 1990. Effect of modified atmospheres on insects and mites infesting stored products. pp. 21-38. In Food preservation by modified atmosphere. eds. by M. Calderon, R. Barkai-Golan. CRC, Boca Raton, FL.
- Follett, P.A., Neven, L.G., 2006. Current trends in quarantine entomology. Annu. Rev. Entomol. 51, 359-385.
- Hochachka, P.W., Somero, G.N., 1984. Biochemical Adaptation. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Hoffman, K.H., 1985. Metabolic and enzyme adaptation to temperature. pp. 1-32. In Environmental physiology and biochemistry of insects. eds. K.H. Hoffman. Springer, NY.
- Hollingsworth, R.G., Armstrong, J.W., 2005. Potential of temperature, controlled atmospheres, and ozone fumigation to control thrips and mealybugs on ornamental plants for export. J. Econ. Entomol. 98, 289-298.
- Ikediala, J.N., Tang, J., Neven, L.G., Drake, S.R., 1999. Quarantine treatment of cherries using 915 MHz microwaves: temperature mapping, codling moth mortality and fruit quality. Postharvest Biol. Technol. 16, 127-137.
- Jung, C.R., Kim, Y., 2011. Different types of fruit damages of three internal apple feeders diagnosed with mitochondrial molecular markers. J. Asia Pac. Entomol. 16, 189-197.
- Kanga, L.H.B., Pree, D.J., Plapp, Jr., F.W., van Lier, J.L., 2001. Sex-linked altered acetylcholinesterase resistance to carbamate insecticides in adults of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Lepidoptera; Tortricidae). Pestic. Biochem. Physiol. 71, 29-39.
- Kells, S.A., Mason, L.J., Maier, D.E., Woloshuk, C.P., 2001. Efficacy ad fumigation characteristics of ozone in stored maize. J. Stored Prod. Res. 37, 371-382.
- Koval, T.M., 1994. Intrinsic stress resistance of cultured Lepidopteran cells. pp. 157-185. In Insect cell biotechnology. eds. by K. Maramorosch, A. McIntosh. CRC, Boca Raton, FL.
- Liu, Y.B., 2003. Effects of vacuum and controlled atmosphere on insect mortality and lettuce quality. J. Econ. Entomol. 96, 1110-1117.
- Nelson, S.O., 1996. Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control. Trans. ASAE 39, 1475-1484.
- Neven, L.G., 2008a. Organic quarantine treatment for tree fruits. HortScience 43, 22-26.
- Neven, L.G., 2008b. Development of a model system for rapid assessment of insect mortality in heated controlled atmosphere quarantine treatments. J. Econ. Entomol. 101, 295-301.

- Neven, L.G., Drake, S.R., 2000. Comparison of alternative quarantine treatments for sweet cherries. *Postharvest Biol. Technol.* 20, 107-114.
- Neven, L.G., Drake, S.R., Shellie, K., 2001. Development of a high temperature controlled atmosphere quarantine treatment for pome and stone fruits. *Acta Hort.* 553, 457-460.
- Neven, L.G., Follett, P.A., Raghubeer, E., 2007. Potential for high hydrostatic pressure processing to control quarantine insects in fruit. *J. Econ. Entomol.* 100, 1499-1503.
- Neven, L.G., Hansen, L.D., 2010. Effects of temperature and controlled atmospheres on codling moth metabolism. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 103, 418-423.
- Neven, L.G., Mitcham, E.J., 1996. CATTs: controlled atmosphere temperature treatment system, a novel approach to the development of quarantine treatments. *Am. Entomol.* 42, 56-59.
- Neven, L.G., Rehfield-Ray, L., 1995. Comparison of prestorage heat treatments on fifth-instar codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) mortality. *J. Econ. Entomol.* 88, 1371-1375.
- Neven, L.G., Rehfield-Ray, L., 2006a. Combined heat and controlled atmosphere quarantine treatments for control of western cherry fruit fly in sweet cherries. *J. Econ. Entomol.* 99, 658-663.
- Neven, L.G., Rehfield-Ray, L., 2006b. Confirmation and efficacy tests against codling moth and oriental fruit moth in apples using combination heat and controlled atmosphere treatments. *J. Econ. Entomol.* 99, 1620-1627.
- Neven, L.G., Rehfield-Ray, L., Obenland, D., 2006. Confirmation and efficacy tests against codling moth and oriental fruit moth in peaches and nectarines using combination heat and controlled atmosphere treatments. *J. Econ. Entomol.* 99, 1610-1616.
- Nikam, T.B., Khole, V.V., 1989. *Insect spiracular systems*. Wiley, NY.
- NOP (National Organic Program), 2007. National Organic Program. <http://www.ams.usda.gov/nop/indexIE.htm>.
- Obenland, D., Neipp, P., Mackey, B., Neven, L.G., 2005. Peach and nectarine quality following treatment with high temperature forced air combined with controlled atmospheres. *HortScience* 40, 1425-1430.
- Paull, R.E., Armstrong, J.W., 1994. *Insect pests and fresh horticultural products: treatments and responses*. CAB International, Wallingford, UK.
- Pimentel D., Lach, L., Zuniga, R., Morrison, D., 2002. Environmental and economic costs of alien arthropods and other organisms in the United States. pp. 285-303. *In Invasive arthropods in agriculture: problems and solutions*. eds. by G.J. Hallman, C.P. Schwalbe. Science, Enfield, NH.
- Pree, D.J., Whitty, K.J., van Driel, L., Walker, G.M., Van Driel, L., 1998. Resistance to insecticides in oriental fruit moth populations (*Grapholita molesta*) from the Niagara Peninsula of Ontario. *Can. Entomol.* 130, 245-256.
- Sharp, J.L., Hallman, G.J., 1994. *Quarantine treatments for pests and food plants*. Westview, Boulder, CO.
- Son, Y., Choi, K.H., Kim, Y., Kim, Y., 2010. Application of CATTs as a postharvest phytosanitation technology against the peach fruit moth, *Carposina sasakii* Matsumura. *Kor. J. Appl. Entomol.* 49, 37-42.
- Son, Y., Chon, I., Neven, L., Kim, Y., 2012a. Controlled atmosphere and temperature treatment system to disinfest fruit moth, *Carposina sasakii* (Lepidoptera: Carposinidae) on apples. *J. Econ. Entomol.* 105, 1540-1547.
- Son, Y., Lee, J., Kim, Y., 2012b. Controlled efficacy of controlled atmosphere and temperature treatment system against the hawthorn spider mite, *Tetranychus viennensis*. *Kor. J. Appl. Entomol.* 51, 131-140.
- Song, S., Choi, K., Lee, S., Kim, Y., 2007. DNA markers applicable for identification of two internal apple feeders, *Grapholita molesta* and *Carposina sasakii*. *Kor. J. Appl. Entomol.* 46, 175-182.
- Tang, J., Ikediala, J.N., Wang, S., Hansen, J.D., Cavalieri, R.P., 2000. High-temperature short-time thermal quarantine methods. *Postharvest Biol. Technol.* 21, 129-145.
- Toba, H.H., Howell, J.F., 1991. An improved system for mass-rearing codling moths. *J. Entomol. Soc. Br. Columbia* 88, 22-27.
- Torres, J.A., Velazquez, G., 2005. Commercial opportunities and research challenges in the high pressure processing of foods. *J. Food Eng.* 67, 95-112.
- Usmani, K.A., Shearer, P.W., 2001. Topical pheromone trap assays for monitoring susceptibility of male oriental fruit moth (Lepidoptera: Tortricidae) populations to azinphosmethyl in New Jersey. *J. Econ. Entomol.* 94, 233-239.
- Wang, S., Tang, J., Johnson, J.A., Micham, E., Hansen, J.D., 2002. Process protocols based on radio frequency energy to control field and storage pests in inshell walnuts. *Postharvest Biol. Technol.* 26, 265-273.
- Yin, X., Wang, S., Tang, J., Hansen, J.D., Lurie, S., 2006. Thermal conditioning of fifth-instar *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) affects HSP70 accumulation and insect mortality. *Physiol. Entomol.* 31, 241-247.