

# 이산화탄소 혼합 처리를 통한 이산화염소 훈증 처리 효과 제고 기술

김철영 · 권 혁<sup>1</sup> · 김 옥<sup>1</sup> · 김용균\*

안동대학교 식물 의학과, <sup>1</sup>고려대학교 생명공학부

## Enhanced Control Efficacy of a Fumigant, Chlorine Dioxide, by a Mixture Treatment with Carbon Dioxide

Chulyoung Kim, Hyeok Kwon<sup>1</sup>, Wook Kim<sup>1</sup> and Yonggyun Kim\*

Department of Plant Medicals, Andong National University, Andong 36729, Korea

<sup>1</sup>Department of Life Sciences and Biotechnology, Korea University, Seoul 02841, Korea

**ABSTRACT:** Fumigation using chlorine dioxide (ClO<sub>2</sub>) has been regarded as a potential control technique against stored grain insect pests. The control efficacy can be enhanced with increase of opening rates of spiracles by facilitating the toxic gas delivery to internal body. To test this hypothesis, this study used the Indianmeal moth, *Plodia interpunctella*, which was known to be susceptible to ClO<sub>2</sub>, and analyzed the opening rate of spiracles. A total of 9 pairs of spiracles were observed in *P. interpunctella* larvae, in which one pair was located on the prothorax and eight pairs were on the abdomen. Within the body, the spiracles were connected to longitudinal and transverse tracheal trunks. The open spiracles were determined by the dye-infiltration method. Based on this method, the opening rate of spiracles increased up to about 60% with increase of ambient temperatures. Furthermore, exposure to carbon dioxide stimulated the opening rate of spiracles up to about 95%. In contrast, exposure to ClO<sub>2</sub> prevented the spiracle opening and resulted in only 25% of spiracles in an opening state. The addition of carbon dioxide to ClO<sub>2</sub> treatment rescued the opening rate of spiracles as much as the carbon dioxide single treatment. Based on this modulatory activity of carbon dioxide against spiracles, the combined treatment of ClO<sub>2</sub> with carbon dioxide resulted in significant increase of its toxicity against *P. interpunctella* compared to a single ClO<sub>2</sub> treatment.

**Key words:** Chlorine dioxide, *Plodia interpunctella*, Spiracle, Trachea, Control

**초록:** 이산화염소 훈증 처리는 저곡해충에 대한 방제 가능성을 가지고 있다. 특히 체내로 독성 가스의 침투력을 높이기 위해 기문의 개방화를 유도하면 이 훈증 가스 처리 효과를 증가시킬 수 있다. 이 가설을 증명하기 위해 본 연구는 이산화염소 훈증 처리에 감수성을 보이는 화랑곡나방 (*Plodia interpunctella*)을 대상으로 기문 개방 활동을 분석하였다. 화랑곡나방 유충의 기문은 모두 9쌍으로 앞가슴에 1쌍 그리고 복부에 8쌍을 각각 지니고 있다. 이들은 몸 내부에 가로 및 세로기관지와 연결된 구조를 지녔다. 기문 개방 유무는 염색액 침투 방법으로 판정하였으며 이를 토대로 분석한 결과 주변 온도 증가에 따라 기문 개방화는 약 60% 까지 증가하였다. 특히 이산화탄소에 노출되면 기문개방화는 약 95%까지 증가하였다. 반면에 이산화염소에 노출되면 화랑곡나방 유충의 기문은 대부분 닫혀 기문개방율이 약 25%로 줄었다. 이산화염소 처리에 이산화탄소를 추가한 결과 기문개방율은 이산화탄소 단독 처리만큼 크게 증가하였다. 이를 토대로 두 혼합 가스를 처리하여 살충효과를 분석한 결과 이산화염소 단독 처리에 비해 혼합처리가 현격하게 높은 살충력을 나타냈다.

**검색어:** 이산화염소, 화랑곡나방, 호흡, 기문, 기관지, 방제

곤충은 기관지(trachea)를 이용하여 각 세포까지 산소를 전달하고 이산화탄소를 배출시키는 기관지 호흡 방식을 이용하

고 있다(Harrison et al., 2013). 즉, 기문(spiracle)을 통해 외부로 부터 들어오는 산소는 기관지 및 기관소지(tracheole)를 지나 각 세포로 전달된다. 역으로 세포에서 생성된 이산화탄소는 기관소지 및 기관지를 지나 기문을 통해 외부로 배출된다. 따라서 곤충은 대부분의 공기전달이 기체 매질에서 일어나기에 액체 매질인 혈액을 통해 공기를 교환하는 다른 동물에 비해 높은

\*Corresponding author: [hosanna@anu.ac.kr](mailto:hosanna@anu.ac.kr)

Received May 13 2017; Revised May 29 2017

Accepted June 15 2017

공기교환 효율을 나타내고 있다. 이러한 기관지 호흡 방식은 해충을 방제하려는 훈증제 처리에 오히려 높은 감수성 표적이 되기도 한다(Marais et al., 2005).

이산화염소( $\text{ClO}_2$ )는 높은 산화력을 기반으로 병원미생물에 대한 소독제로 사용되고 있다. 또한 이 물질이 유도하여 생성되는 활성산소(reactive oxygen species: ROS)는 다양한 생명체에 생리적 교란을 줄 수 있다. 이산화염소를 기체 형태로 생산할 수 있는 기술이 개발되어 훈증 처리가 가능하여졌으며, 이를 주거 및 병원 시설에 처리하면 틈새 또는 바닥에 서식하는 의학해충의 일종인 빈대(*Cimex lectularius*)를 효과적으로 구제하게 된다(Gibbs et al., 2012). 최근에는 화랑곡나방(*Plodia interpunctella*)과 거릿쌀도둑거저리(*Tribolium castaneum*)와 같은 저곡해충에도 이산화염소 처리는 높은 방제 효과를 나타냈다(Kim et al., 2015a; Kumar et al., 2015).

이산화염소의 살충기작을 규명하기 위한 연구가 진행되었다. 기본적으로 이 물질이 생성하는 ROS를 기반으로 교란의 표적이 되는 생리과정과 이에 상응한 생체분자를 추적하는 데 연구력이 모아졌다(Kumar et al., 2015). 이산화염소 처리는 거릿쌀도둑거저리의 음성주광성 행동을 교란시키는 데, 이는 이 물질이 아세틸콜린에스테레이즈의 활성을 증가시키는 것과 관련성을 제기하였다(Kim et al., 2015a). 이산화염소는 곤충세포는 물론이고 인체의 암세포까지 세포독성을 지녔다(Kim et al., 2016). 그러나 ROS를 막기 위한 항산화제를 처리하면 이러한 세포손상을 억제할 수 있었다(Kim et al., 2015b). 이산화염소 처리는 화랑곡나방의 면역기능을 둔화시켜 혈구세포활착 및 소낭형성의 기능을 현격하게 억제하였다(Kumar et al., 2015). 또한 이 해충의 순환계에도 영향을 주어 이산화염소 처리를 받으면 심장박동수가 크게 격감하여 혈액순환작용을 둔화시켰다(Kim et al., 2017). 이와 같이 이산화염소가 대상 곤충에 대해서 다양한 억제종말점을 갖는 이유는 이 물질이 생성하는 ROS의 작용으로 해석되었다.

본 연구는 이산화염소의 해충 생리 교란의 일환으로 화랑곡나방의 호흡에 미치는 영향을 분석하는 데 목적을 두었다. 이를 위해 화랑곡나방의 기문 및 기관지 구조를 분석하였다. 이후 기문의 개폐 활동을 온도와 이산화탄소 노출에 따라 분석하였다. 이때 이산화염소 처리에 따른 화랑곡나방의 기문활동 교란을 분석하였다. 이러한 기문활동을 기반으로 이산화염소 처리에 이산화탄소 혼합 처리를 통해 이 훈증제 처리의 최적 방제 기술을 개발하여 보고한다.

## 재료 및 방법

### 공시충 사육

본 연구에서 이용된 공시충의 사육은 Kumar et al. (2015)에 기술된 방법을 따랐다. 사육 조건은  $25^\circ\text{C}$  항온조건과 65-75% 상대습도에서 16:8 (L:D) h의 광주기를 이용하였다. 본 연구의 다양한 처리는 모두 5령 유충을 이용하였다.

### 이산화염소 제조 및 처리 방법

Sodium chlorite ( $\text{NaClO}_2$ )를 전기분해방식(Gates, 1998)으로 분리하여 이산화염소를 제조하였다. 간략하게 과정을 소개하면,  $\text{NaClO}_2$ 를 전기적으로 분리하여 양극성의 소듐이온은 다공성 막을 통해 음극으로 이동하게 하고, 순수한 이산화염소(> 99%)만 음극에 남게 하였다. 이 용액을 각 실험 목적에 따라 증류수로 희석하여 사용하였다. 훈증 처리의 경우는 밀폐 사각용기( $54 \times 44 \times 46$  cm)를 이용하여 기화된 이산화염소를 불어 넣었다. 이때 용기 내에 이산화염소의 농도는 PortaSens II 가스누수검출기(Analytical Technology, Collegeville, PA, USA)를 이용하여 10분 간격으로 감지하여 가스 주입량을 조절하여 용기 내 농도를 실험목적에 따라 맞추었다.

### 주사전자현미경을 이용한 기문 구조 관찰

주사전자현미경(S-2500C, Hitachi, Tokyo, Japan) 분석을 위해 화랑곡나방 5령충 전체를 양면테이프를 이용하여 시료대에 부착시켰다. 이 시료를  $60^\circ\text{C}$  오븐에 10분 동안 건조시켰다. 이후 Spurr Coater CP 3030 SCD 005/Baltec을 사용하여 금으로 증착한 뒤 주사전자현미경으로 15-25 KV에서 관찰하였다.

### 염색액 침투기술을 이용한 개방 기문 확인 및 기관지 구조 관찰

전체 기관지의 분포를 확인하기 위해 이산화탄소에 노출시킨 화랑곡나방 5령충을  $-70^\circ\text{C}$ 에서 10분간 저온 처리하여 기문의 추가 개폐 활동이 없도록 빠르게 치사시킨 후 methylene blue 염색액(methylene blue 3 g, 95% ethanol 300 mL, 증류수 100 mL)에 25 초 간 침지시킨 후 해부하여 열린 기문을 통해 기관지로 스며들어간 염색액을 확인하고 이를 유발한 기문을 개방된 것으로 판정하였다. 또한 이러한 염색액 침투기술을 이용하여 화랑곡나방 유충의 주요 기관지의 분포를 관찰하였다.

## 기문개폐에 대한 온도 효과

화랑곡나방 5령충을 15, 20, 25, 30, 35°C의 인큐베이터에 8시간 처리한 후에 상기의 염색액 침투기술로 개방 기문수를 확인하였다. 이때 인큐베이터들의 상대습도는 55-60%를 기록하였다. 기문 개폐율은 전체 9쌍의 기문을 대상으로 열린 기문 쌍을 계수하여 비율로 산출하였다. 각 처리는 10마리를 이용하여 3반복으로 실시되었다.

## 기문개폐에 대한 이산화탄소 효과

밀폐 원형용기(직경 9 cm)를 이용하여 화랑곡나방 5령충 10마리를 넣은 후 이산화탄소(99%) 가스를 용기내로 채웠다. 이후 25°C에서 10분간 처리한 후 상기의 염색액 침투기술로 개방 기문수를 확인하였다. 기문개폐율 산출은 상기와 동일하였다. 각 처리는 10마리를 이용하여 3반복으로 실시되었다.

## 기문개폐에 대한 이산화염소 효과

상기의 이산화탄소 효과 분석법과 유사한 방법으로 이산화염소 처리 효과를 분석하였다. 이때 이산화염소는 밀폐 원형용기에 깔린 여과지에 800 ppm의 용액 500 µl를 분주하여 용기내에 기화되는 이 가스에 2시간 노출되게 하였다. 이후 상기의 염색액 침투기술로 개방 기문수를 확인하였다. 기문개폐율 산출은 상기와 동일하였다. 각 처리는 10마리를 이용하여 3반복으로 실시되었다.

## 이산화탄소와 이산화염소의 혼합 처리에 따른 살충력 분석

두 가스의 혼합 처리는 순차적으로 25°C에서 진행되었다. 각 밀폐 원형용기(직경 9 cm)에 20마리의 5령충 화랑곡나방을 넣었다. 이들 밀폐 용기들의 뚜껑을 반쯤 연 채 다시 밀폐 사각용기(54 × 44 × 46 cm) 내부에 설치하였다. 이 밀폐 사각 용기도 뚜껑이 열어 둔 채로 CO<sub>2</sub> 인큐베이터(MCO-15AC, Sanyo, Tokyo, Japan)에서 1시간 동안 15% 이산화탄소 가스에 노출되었다. 이후 밀폐 사각용기의 뚜껑을 닫고(이때에도 원형용기의 뚜껑은 열려 있다) 이산화염소 처리 장소로 옮겨 사각 용기 뚜껑에 위치한 밀폐된 주입구를 통해 100 ppm 농도의 이산화염소를 12시간 동안 주입하였다. 이산화염소 단독 처리는 이산화탄소 가스에 노출하지 않고 바로 이산화염소 가스에 12시간 처리하였다. 이후 야외의 공기로 환기된 실내 조건에 노출 후 2시간 방치 후 생존 개체를 계수하였다. 여기서 시험구는 원형용기이며 각 처리는 3 반복으로 실시되었다.

## 통계분석

기문개폐율과 생존율 결과들은 arcsin transformation 후에 SAS의 PROC GLM (SAS Institute, 1989)을 이용하여 one-way ANOVA 분석을 실시하였고 평균간 비교는 LSD 방법을 이용하였다. 처리 사이에 차이는 제 I형 오류의 확률을 0.05로 기준하여 판별하였다.

## 결과

### 화랑곡나방의 기문 및 기관지 구조

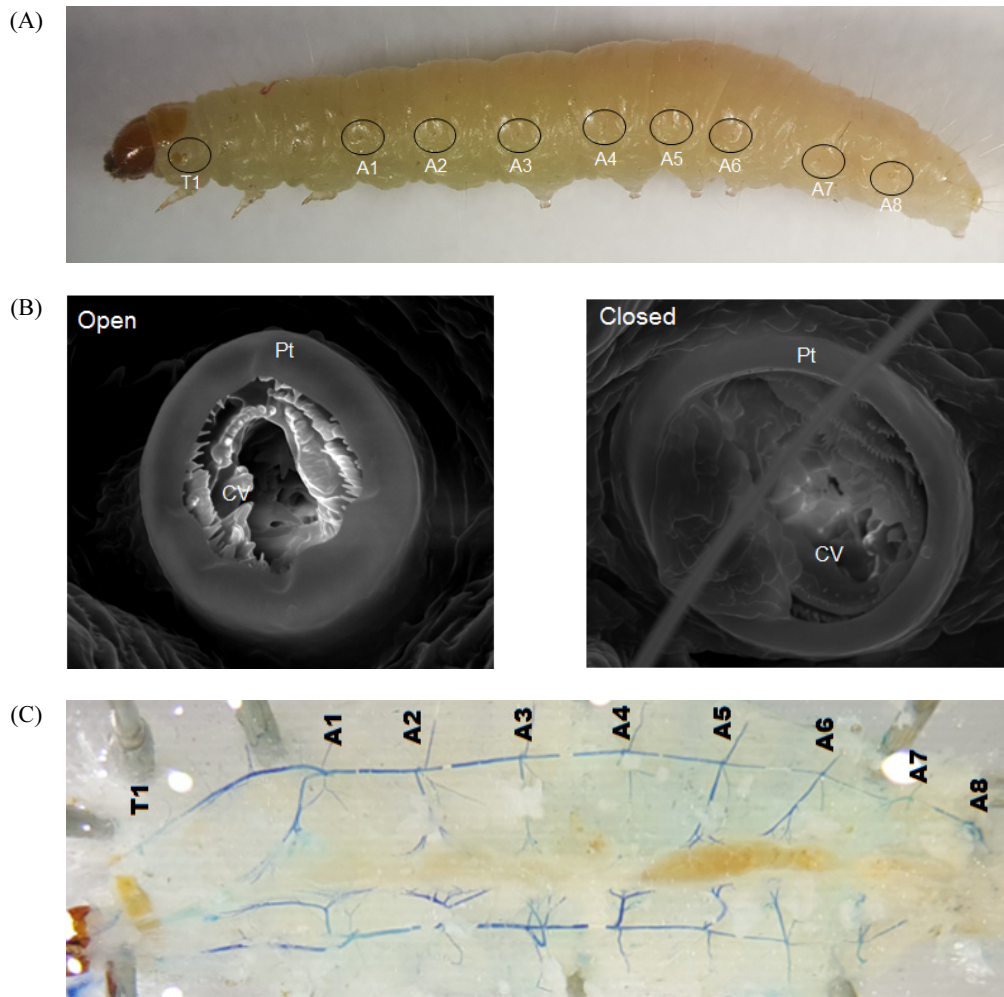
화랑곡나방 5령 유충을 대상으로 기문의 구조와 수를 관찰하였다(Fig. 1). 머리를 제외하고 가슴과 배에 기문이 존재하였다(Fig. 1A). 앞가슴에 1쌍, 복부에 8쌍이 존재하여 전체 9쌍의 기문이 각 몸마디의 옆면(pleuron)에 존재하였다. 기문의 미세 구조를 살펴보기 위해 주사전자현미경으로 관찰한 결과 체벽에 기문주위벽(peritreme)을 갖고 있으며, 기방(atrium) 내에는 체 모양의 폐쇄판(closing valve)이 존재하였고, 이 폐쇄판들의 열고 닫음에 의해 기문의 개폐가 이뤄지는 것을 알 수 있었다(Fig. 1B). 체내 기관지의 분포를 알아보기 위해 methylene blue 염색액을 열린 기문을 통해 주입하여 기관지 분포를 관찰하였다(Fig. 1C). 이 결과 각 기문에서 기관지가 세로 및 가로로 뻗어 나오는 것을 관찰하였다.

### 화랑곡나방의 기관 개폐 활동

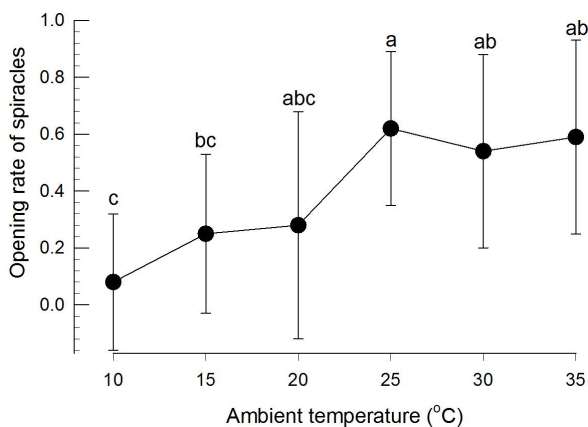
화랑곡나방 유충의 기문 개폐를 열린 기문을 통해 염색액 침투 방법에 따라 관찰할 수 있었다. 이러한 염색액 침투방법을 이용하여 주변 온도에 따라 화랑곡나방의 기문 활동을 분석하였다(Fig. 2). 온도가 증가함에 따라 기문의 개폐 활동이 뚜렷이 증가하였다( $F=3.77$ ;  $df=5, 53$ ;  $P=0.0054$ ). 약 60%의 기문이 25-35°C 온도에서 열려 있었다.

화랑곡나방 유충 기문 활동에 대한 이산화탄소의 영향을 분석하였다(Fig. 3). 무처리의 경우 기문 개폐가 기문 마다 차이를 보여 25-85%의 변이를 보이며 전체적으로 약 60%의 기문개방율을 나타냈다. 그러나 이산화탄소에 노출될 경우 모든 기문의 개방을 촉진하여 전체적으로 약 95%의 기문개방율을 나타냈다. 이산화탄소에 처리된 개체들은 처리 후 모두 생존하였다.

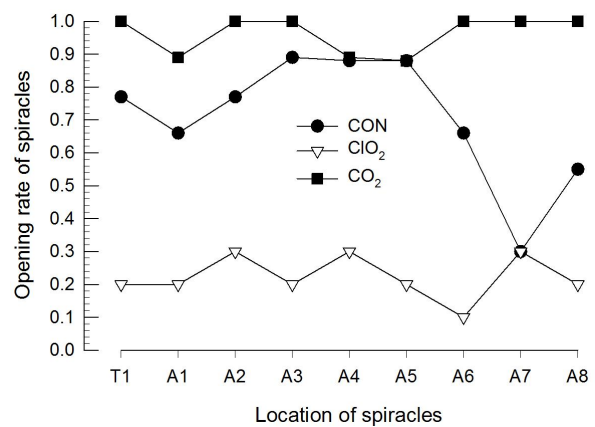
이산화탄소의 기문 개방 촉진 효과와 비교하여 이산화염소의 경우는 화랑곡나방의 기문 개방화를 억제하여 전체적으로 약 25%의 기문개방율을 나타냈다.



**Fig. 1.** Tracheal system of *P. interpunctella* larvae. (A) External view of 9 spiracles: one in prothorax (T1) and eight in abdomen (A1-A8). (B) Scanning electron microscope photos of open and closed spiracles: peritreme ('P') and closing valve ('CV'). (C) Two longitudinal trachea and transverse trachea stained by back-filling technique of 0.05% methylene dye through spiracles.



**Fig. 2.** Increase of opening rate of *P. interpunctella* larval spiracles with ambient temperature. Each treatment was replicated three times, in which each replication used 10 larvae to measure opening rate. Different letters indicate significant difference among means at Type I error = 0.05 (LSD test).

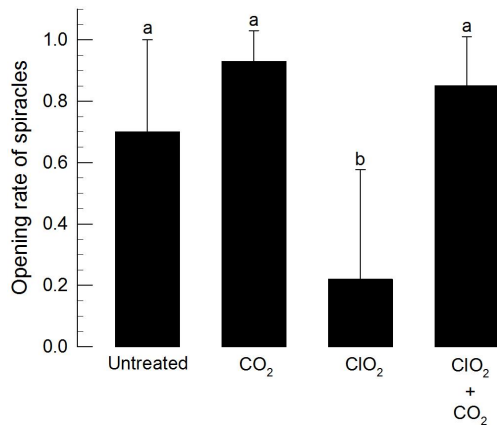


**Fig. 3.** Influence of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and chlorine dioxide (ClO<sub>2</sub>) gases on opening spiracles of *P. interpunctella* larvae. Opening rates of individual spiracles were measured on thorax ('T1') and abdomen ('A1-A8').

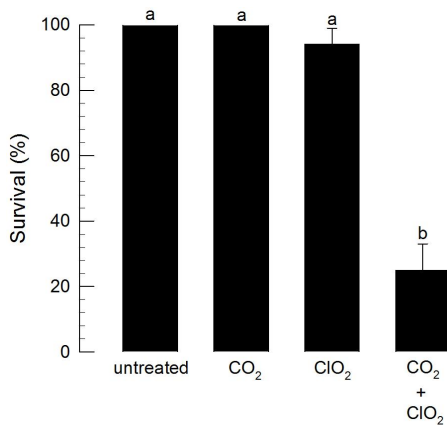
## 이산화탄소 첨가에 따른 이산화염소 살충력 상승효과

이산화탄소와 이산화염소의 상반된 기문 활동 조절 효과는 이들의 혼합 처리 효과에 대한 의구심을 갖게 하였다. 이에 두 가스 처리를 동시에 한 결과 기문개방화는 무처리 또는 이산화탄소 처리 수준만큼 증가되었다(Fig. 4).

복합 가스 처리에서 이산화탄소의 기문 활동 증가 효과는 이산화염소를 이용한 기존의 혼중 처리기술(Kumar et al., 2015)을 개량시킬 것으로 추정하였다. 이때 이산화탄소 처리는 환경 조절열처리 혼중 처리(Jung et al., 2014)에서 사용하는 15% 농도를 이용하였다. 이 이산화탄소 농도 처리에서 사망 개체는 없



**Fig. 4.** Antagonistic action of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) on the influence of chlorine dioxide (ClO<sub>2</sub>) on closing spiracles of *P. interpunctella* larvae. Each treatment was replicated three times, in which each replication used 10 larvae to measure opening rate. Different letters indicate significant difference among means at Type I error = 0.05 (LSD test).



**Fig. 5.** Potentiation of chlorine dioxide (ClO<sub>2</sub>) toxicity by the addition of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) against 5th instar larvae of *P. interpunctella*. The larvae were exposed to 15% CO<sub>2</sub>, 100 ppm of ClO<sub>2</sub> or both for 12 h. Each measurement used 20 larvae and was replicated three times per treatment. Different letters indicate significant difference among means at Type I error = 0.05 (LSD test).

었다. 이를 바탕으로 두 가스의 단독 및 복합 처리를 한 결과, 이산화염소 단독 처리에 비해 복합처리가 현격하게 높은 살충효과를 주었다(Fig. 5).

## 고찰

화랑곡나방 유충은 모두 9쌍의 기문이 몸의 양쪽 옆판에 위치하였다. 앞가슴에 1쌍과 배 부위에 8쌍을 각각 지니고 있었다. 모든 곤충류에서 보듯, 머리에는 기문이 존재하지 않았다. 기문의 구조는 전체적으로 기문주위벽을 입구로 내부에 기방이 존재하고, 기방 내부에는 체 모양의 폐쇄판이 존재하여 기문의 개폐를 조절할 수 있는 구조로 나타났다. 육상곤충의 경우 소형동물로서 체내 수분 보존이 생명과 직결된다. 따라서 기문 개방화는 체내 수분 손실을 감당해야하기에 생리적으로 필요한 조건에서만 일어나는 행동이다. 이를 위해 기문 폐쇄근의 수축을 통해 기문을 닫게 된다. 기문의 개방화를 유도하는 인자로서는 기관지 내부의 이산화탄소와 산소의 양에 따라 결정된다(Förster and Hetz, 2010). 또한 기관지 내부의 효과적 공기 확산을 위해 기문의 개방화가 유도된다(Tenney, 1985). 특히 이산화탄소 농도는 기문 개방화를 촉진하는 데 결정적인 요인으로 척추동물과 달리 직접 폐쇄근에 작용하여 이를 이완시킴으로 기문 개방화를 유도하게 된다(Burkett and Schneiderman, 1967). 본 연구에서는 이산화탄소 가스 노출에 따라 화랑곡나방의 기문 개방화가 유도되었다. 이는 화랑곡나방에서도 기문 개방화에 이산화탄소가 체내에서 탄산이온으로 축적되어 직접 폐쇄근에 작용하여 폐쇄판을 열어주었을 것으로 사료된다.

기문은 여러 병원체 및 화학물질이 곤충 체내로 들어가는 통로로 이용되었다. 곤충병원선충의 경우 기주 곤충의 개방구인 입, 항문 그리고 기문을 통하여 곤충의 혈강으로 침입하게 된다(Kaya and Gaugler, 1993). 양봉 농가에 큰 피해를 주고 있는 꿀벌기문응애(*Acarapis woodi*)는 기문을 통해 감염하여 꿀벌의 기관지 내에 서식하며 병을 일으키게 된다(Sammataro et al., 2000). 피레스로이드 살충제의 경우 성충에 있어 기절 효과를 나타내는 데 곤충에 처리하면 가장 빠르고 효과적인 통로가 기문을 경유하는 경로였다(Sumita et al., 2016). 따라서 이산화염소에 노출되면서 일어나는 화랑곡나방의 기문 개방 억제 효과는 이 혼중제 처리에 따른 치사 효과를 낮추는 화랑곡나방의 방어행동으로 간주할 수 있다. 즉, 화랑곡나방은 이산화염소를 감지할 수 있고, 이러한 감지 신호는 중추신경계에 작용하여 기문을 닫게 하는 행동을 유발하였을 것으로 추정한다. 거저쌀도둑 거저리의 경우에서도 이산화염소가 처리되면 이를 감지하여 먹이 속으로 들어가는 회피행동을 보였다(Kim et al., 2015a).

이러한 회피행동들은 곤충이 이산화염소를 감지하고 이에 대한 방어행동을 보일 수 있다는 것을 의미한다. 기문을 닫는 행동은 일반적인 외부 환경 스트레스에도 나타난다. 예를 들어, 휴면하는 나방류의 경우 불연속가스교환방식을 취할 때 대부분의 휴면 기간 동안 기문을 닫은 상태에서 산소 분압에 따라 기문을 미세하게 열고 닫으며 공기교환을 이루게 된다(Marais et al., 2005). 또한 육상곤충이라 하더라도 빗물에 의해 몸 표면이 물에 잠기는 경우 기문을 닫는 행동으로 외부 환경 스트레스를 모면하게 된다(Gudowska et al., 2016).

이산화염소에 대해서 기문을 닫음으로 유해 가스 노출에 대한 방어기작을 펼친 화랑곡나방은 이산화탄소의 혼합 처리로 인해 기문 개방화가 유도되었고, 이로 인하여 이산화염소의 체내 이동이 원활하여졌을 것이고 결과적으로 살충 효과가 크게 증가하였다. 이산화탄소의 혼증제에 대한 협력 효과는 다른 혼증제들의 효과에서 입증되었다. 예를 들어, 꽃노랑총채벌레 (*Frankliniella occidentalis*)를 방제하려는 식물정유 성분인 *p*-cymene 혼증제의 경우 이산화탄소와 혼합 처리한 경우 단독보다 현격히 높은 방제 효과를 거두었는데 이러한 상승효과는 기문 활동이 활발한 약충과 성충에서 나타났지만, 기문의 활동이 없는 알의 경우에는 나타나지 않았다(Janmaat et al., 2002). 또한 현재 여러 검역해충 방제 사용하고 있는 Vapormate의 경우 살충성분인 ethyl formate는 16.7%에 불과하고 나머지는 이산화탄소를 혼합하여 처리하고 있다(Dojchinov et al., 2010). 높은 농도(85%)의 이산화탄소 처리는 직접적으로 화랑곡나방을 치사시킬 수 있다(Na et al., 2006). 그러나 본 연구에서 처리한 이산화탄소의 농도는 15% 또는 이하로서 정밀한 밀폐 장치가 없어도 현장에 적용할 수 있는 기술로 판단된다.

이상의 결과는 이산화염소 처리에 대한 화랑곡나방 호흡계의 방어기작을 관찰할 수 있었고, 이를 이산화탄소와 혼합 처리로 기문개방화를 유도하여 혼증 효과를 크게 증가시키는 기술을 제시하고 있다. 본 연구는 이산화염소 처리에 비교적 내성이 높은 종령 유충을 대상으로 실시되었으나 추후 다양한 발육태에 대해서 이산화탄소와 혼합 처리에 대한 연구가 추가될 필요가 있다. 이를 바탕으로 향후 이러한 기술을 현장에 접목시킬 수 있는 처리 시스템이 개발되어 저곡해충 방제를 겨냥하는 이산화염소의 혼증 처리가 보다 효과적으로 응용되기를 기대한다.

## 사 사

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술평가원의 농생명산업기술개발사업(114063-03)의 지원을 받아 연구되었다.

## Literature Cited

- Burkett, B.N., Schneiderman, H.A., 1967. Control of spiracles in silk moths by oxygen and carbon dioxide. *Science* 156, 1604-1606.
- Dojchinov, G., Damcevski, K.A., Woodman, J.D., Haritos, V.S., 2010. Field evaluation of vaporised ethyl formate and carbon dioxide for fumigation of stored wheat. *Pest Manag. Sci.* 66, 417-424.
- Förster, T.D., Hetz, S.K., 2010. Spiracle activity in moth pupae—the role of oxygen and carbon dioxide revisited. *J. Insect Physiol.* 56, 492-501.
- Gates, D.J., 1998. *The Chlorine Dioxide Handbook*, American Water Works Association, Denver, CO.
- Gibbs, S.G., Lowe, J.J., Smith, P.W., Hewlett, A.L., 2012. Gaseous chlorine dioxide as an alternative for bedbug control. *Infect. Control Hosp. Epidemiol.* 33, 495-499.
- Gudowska, A., Boardman, L., Terblanche, J.S., 2016. The closed spiracle phase of discontinuous gas exchange predicts diving duration in the grasshopper *Paracrinema tricolor*. *J. Exp. Biol.* 219, 2423-2425.
- Harrison, J.F., Waters, J.S., Cease, A.J., Vandenbrooks, J.M., Callier, V., Klok, C.J., Shaffer, K., Socha, J.J., 2013. How locusts breathe. *Physiology* 28, 18-27.
- Janmaat, A.F., de Kogel, W.J., Woltering, E.J., 2002. Enhanced fumigant toxicity of *p*-cymene against *Frankliniella occidentalis* by simultaneous application of elevated levels of carbon dioxide. *Pest. Manag. Sci.* 58, 167-173.
- Jung, C., Kwon, K., Kim, Y., 2014. A postharvest control technique of the Oriental fruit moth, *Grapholita molesta*, infesting apples using CATTs. *Korean J. Appl. Entomol.* 53, 73-80.
- Kaya, H.K., Gaugler, R., 1993. Entomopathogenic nematodes. *Annu. Rev. Entomol.* 38, 181-206.
- Kim, C., Kwon, H., Kim, W., Kim, Y., 2017. Inhibitory effect of chlorine dioxide using reactive oxygen species against heart contraction of the Indianmeal moth, *Plodia interpunctella*. *Korean J. Appl. Entomol.* 56, 147-152.
- Kim, Y., Kumar, S., Cheon, W., Eo, H., Kwon, H., Jeon, Y., Jung, J., Kim, W., 2016. Anticancer and antiviral activity of chlorine dioxide by its induction of the reactive oxygen species. *J. Appl. Biol. Chem.* 59, 31-36.
- Kim, Y., Kumar, S., Rahman, M.M., Kwon, H., Chon, Y., Na, J., Kim, W., 2015a. Evasive behavior of the red flour beetle, *Tribolium castaneum*, against chlorine dioxide and its suppression by heat treatment. *Korean J. Appl. Entomol.* 54, 151-158.
- Kim, Y., Park, J., Kumar, S., Kwon, H., Na, J., Chun, Y., Kim, W., 2015b. Insecticidal activity of chlorine dioxide gas by inducing an oxidative stress to the red flour beetle, *Tribolium castaneum*. *J. Stored Prod. Res.* 64, 88-96.
- Kumar, S., Park, J., Kim, E., Na, J., Chun, Y.S., Kwon, H., Kim, W.,

- 
- Kim, Y., 2015. Oxidative stress induced by chlorine dioxide as an insecticidal factor to the Indian meal moth, *Plodia interpunctella*. *Pesti. Biochem. Physiol.* 124, 48-59.
- Marais, E., Klok, C.J., Terblanche, J.S., Chown, S.L., 2005. Insect gas exchange patterns: a phylogenetic perspective. *J. Exp. Biol.* 208, 4495-4507.
- Na, J.H., Nam, Y., Ryoo, M.I., Chun, Y.S., 2006. Control of food pests by CO<sub>2</sub> modified atmosphere: effects of packing materials and exposure time on the mortality of *Tribolium castaneum* and *Plodia interpunctella*. *Korean J. Appl. Entomol.* 45, 363-369.
- Sammataro, D., Gerson, U., Needham, G., 2000. Parasitic mites of honey bees: life history, implications, and impact. *Annu. Rev. Entomol.* 45, 519-548.
- SAS Institute, Inc., 1989. SAS/STAT user's guide. SAS Institute, Inc., Cary, NC.
- Sumita, Y., Kawada, H., Minakawa, N., 2016. Mode of entry of a vaporized pyrethroid knockdown agent into the body of the housefly, *Musca domestica* (Diptera: Muscidae). *Appl. Entomol. Zool.* 51, 653-659.
- Tenney, S.M., 1985. Oxygen supply and limiting oxygen pressures in an insect larva. *Respir. Physiol.* 60, 121-134.