

# 이산화염소에 대한 거짓쌀도둑거저리의 회피행동과 이를 억제하는 열처리 효과

김용균\* · 수닐쿠마르 · 마버버라흐만 · 권혁<sup>1</sup> · 천용식<sup>2</sup> · 나자현<sup>2</sup> · 김욱<sup>1</sup>

안동대학교 생명자원과학과, <sup>1</sup>고려대학교 생명공학부, <sup>2</sup>고려대학교 생명자원연구소

## Evasive Behavior of the Red Flour Beetle, *Tribolium castaneum*, against Chlorine Dioxide and Its Suppression by Heat Treatment

Yonggyun Kim\*, Sunil Kumar, M. Mahbubur Rahman, Hyeok Kwon<sup>1</sup>, Yongsik Chun<sup>2</sup>, Jahyun Na<sup>2</sup> and Wook Kim<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>Department of Life Sciences and Biotechnology, Korea University, Seoul 136-701, Korea

<sup>2</sup>Institute of Life Science and Natural Resources, Korea University, Seoul 136-702, Korea

**ABSTRACT:** Chlorine dioxide (ClO<sub>2</sub>) can be used as a fumigant to kill insects. However, some insects can exhibit an evasive behavior from chlorine dioxide. This evasive behavior decreases the efficiency of the insecticidal activity of chlorine dioxide. This study tested a hypothesis that heat treatment suppresses the evasive behavior and synergizes the control efficacy of chlorine dioxide. Chlorine dioxide fumigation killed the red flour beetle, *Tribolium castaneum*, under direct exposure condition to the chemical for 12 h with median lethal concentrations of 383.67 ppm (153.63 - 955.78 ppm: 95% confidence interval) for larvae and 397.75 ppm (354.46 - 446.13 ppm: 95% confidence interval) for adults. However, when they were treated with enough diet flour, they exhibited an evasive behavior by entering the diet, which significantly decreased the control efficacy of the fumigant. To clarify the evasive behavior, the choice test of the adults were performed in Y tube arena. The test adults significantly avoided the diet treated with chlorine dioxide, while the antennectomized adults lost the avoidance behavior. Heat treatment using 46°C for 6 h killed only 10% or less of *T. castaneum*. Interestingly, most adults were observed to come out of the diet under the heat treatment. Chlorine dioxide treatment even at 400 ppm for 6 h did not kill any *T. castaneum*. However, the combined treatment of chlorine dioxide with the heat treatment for 6 h resulted in 95% mortality. These results indicated that heat treatment suppressed the evasive behavior of *T. castaneum* and synergized the control efficacy of the chlorine dioxide fumigant.

**Key words:** Chlorine dioxide, Heat treatment, Fumigant, Evasive behavior, Stored grain insect pest, *Tribolium castaneum*

**초록:** 이산화염소(ClO<sub>2</sub>) 훈증제는 살충효과를 나타낸다. 그러나 일부 곤충은 이산화염소에 대해 회피행동을 보여, 이 훈증제에 대한 방제효율을 크게 떨어뜨리고 있다. 본 연구는 이를 해결하기 위해 이산화염소 처리에 열처리를 추가하여 곤충의 이산화염소에 대한 회피행동을 줄여 살충효과를 극대화하는 전략을 세웠다. 이산화염소 훈증 처리는 거짓쌀도둑거저리(*Tribolium castaneum*)에 대해 살충효과를 주었으며, 시험 곤충이 노출된 조건에서 12 시간 처리할 때 유충에 대해서 383.67 ppm (153.63 - 955.78 ppm: 95% 신뢰구간), 성충에 대해서 397.75 ppm (354.46 - 446.13 ppm: 95% 신뢰구간)의 반수치사농도를 나타냈다. 그러나 먹이인 밀가루를 충분히 제공한 상태에서 이산화염소를 처리하면, 처리 약제에 반응하여 시험 곤충이 먹이 속으로 들어가는 회피행동을 보이면서 방제효과는 크게 낮아졌다. Y 튜브를 이용한 이 곤충의 먹이 선호성 행동을 분석한 결과 거짓쌀도둑거저리 성충은 이산화염소가 처리된 먹이를 회피하는 행동을 보였다. 그러나 촉각을 제거한 경우 이러한 회피행동은 둔화되었다. 거짓쌀도둑거저리에 6 시간 동안 46°C 열처리를 하면 살충효과는 10% 이하로 낮지만, 처리된 성충들이 먹이 밖으로 나와 있는 것을 관찰하였다. 반면 400 ppm의 이산화염소를 단독으로 6 시간 처리한 결과 회피행동에 따라 전혀 살충효과를 보이지 않았다. 그러나 46°C 열처리와 400 ppm의 이산화염소를 병행하여 6 시간 처리한 결과 살충효과는 95%로 크게 증가하였다. 따라서 열처리는 거짓쌀도둑거저리의 이산화염소에 대한 회피행동을 억제하여 살충효과를 증가시켰다.

**검색어:** 이산화염소, 열처리, 훈증제, 회피행동, 저곡해충, 거짓쌀도둑거저리

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

Received May 13 2015; Revised May 28 2015

Accepted June 2 2015

국내 저장 곡물 및 식품을 가해하는 다양한 해충 주로 딱정벌레목 및 나비목 해충이 가장 많이 차지하며, 여기에 응애류도 포함되고 있다(Choi et al., 1996). 특별히 곡물의 수확기의 기온이 높아 저장 초기에 이러한 해충의 발생과 생육이 가능하여 이에 따른 피해를 증가시키게 된다. 이러한 저장물 해충에 따른 피해는 약 5-10%로 추산되며, 미국의 경우 밀과 옥수수의 경우 연간 125-250 억불의 경제적 피해를 주고 있다(USDA, 2005).

수확후 해충 관리기술은 크게 화학적 및 물리적 처리법으로 대별된다(Paull and Armstrong, 1994; Sharp and Hallman, 1994). 화학적 처리법은 메틸브로마이드나 포스핀과 같은 훈증 처리와 표면에 정착하는 해충을 제거하는 비누화물질 또는 화학농약 처리를 포함한다. 반면에 물리적 처리법은 온도(고온, 저온) 처리, 환경조절처리, 방사선처리 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; Na et al., 2006). 방사선 조사는 해충의 DNA의 화학결합을 붕괴시킴으로 소독효과를 발휘하게 한다. 기타 물리적 처리법으로 오존처리(Hollingsworth and Armstrong, 2005; Kells et al., 2001), 마이크로파처리(Ikediala 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. 그러나 이 가운데 가장 많이 사용되는 저장물 해충 방제 처리는 메틸브로마이드 훈증 처리이지만, 이는 오존층 파괴물질로 점차 사용이 금지될 전망이며 대체 기술 개발이 시급하게 요구되고 있다.

이산화염소는 높은 살균작용으로 실용화되고 있는 소독제이다. 최근 이 화합물을 전기분해방식을 통해 훈증제로 개발하여 저장 곡물을 가해하는 해충에 대해서 새로운 방제제로 유용성을 모색하고 있다. 이 가운데 이 훈증제가 화랑곡나방을 대상으로 살충작용을 보이는 연구 결과가 나왔다(Kumar et al., 2015). 이산화염소의 살충작용은 이 화합물이 곤충 체내에서 활성산소를 증가시키는 기작으로 해석되고 있다. 그러나 딱정벌레를 대상으로 하는 경우 이산화염소 처리에 대한 회피행동이 관찰되었고, 이에 따라 이산화염소 훈증 처리의 효과를 크게 둔화시켰다.

본 연구는 이산화염소에 대한 곤충의 회피행동을 억제하기 위해 열처리 혼합 기술을 고안했다. 이를 수행하기 위해 우선 곤충의 이산화염소에 대한 회피행동을 정량화하였다. 이후 열처리 또는 이산화염소의 단독 처리효과와 혼합처리효과를 각각 비교분석하여 새로운 방제기술을 개발하였다.

## 재료 및 방법

### 거짓쌀도둑거저리 증식

공시충인 거짓쌀도둑거저리 먹이는 밀가루(100 g), 밀배아(50 g) 및 이스트추출물(15 g)을 혼합하여 제조하였다. 사육용기는 지름 15 cm의 원형 플라스틱통에 약 5 cm 정도 먹이를 채우고, 모든 발육시기를 혼합하여 사육하였다. 공기순환을 위해 사육통의 윗면은 망사로 덮었다. 약 3-4주 간격으로 먹이를 교환하여 주었다. 시험에 이용된 유충은 길이 5 mm 이상의 크기였다. 성충은 우화 후 10 일 이내의 개체를 선발하여 시험에 이용하였다. 모든 곤충은 25°C 온도조건, 60% 상대습도 조건에서 사육되었다.

### Y 튜브 행동 분석

유리 재질의 Y 튜브는 3 cm 내부 직경으로, 양쪽 팔의 길이는 16 cm이고 서로 45°의 각도로 벌려져 있으며, 공통관의 길이는 13 cm로 구성되었다(Fig. 3A 참조). 질소 가스가 양쪽 팔로 연결되어 공통관을 통해 빠져나가도록 설계했다. 질소 가스는 우선 수증기를 포함하기 위해 물이 반쯤 차있는 병을 통해 Y 튜브의 양쪽 팔로 들어가게 했다. 주입 질소 가스의 속도는 300 mL/min으로 설정했다. 양쪽 팔 말단에 거짓쌀도둑거저리 먹이를 500 mg 투입하고 여기에 대조구는 인산완충용액, 처리구는 이산화염소 용액(800 ppm)을 각각 100 µL씩 처리하였다. 처리된 거짓쌀도둑거저리 성충은 24 시간 절식시킨 후 공통관 기부에 놓고 10 분간 움직이는 방향으로 결과를 얻었다. 이때 출발점으로부터 먹이 쪽으로 3 cm 움직인 개체를 반응한 개체로 규정하였으며, 분지점을 지나 어느 한쪽으로 움직인 개체는 분지점으로부터 12 cm 움직인 개체를 특정 처리를 선호한 개체로 판명하였다. 처리 후 Y 튜브는 95.5% 아세톤으로 세척하고, 이를 다시 99% 헥산으로 재세척을 실시하였다. 끝으로 물로 헹군 후 건조시켜 다음 실험에 이용하였다.

### 보행행동 분석

거짓쌀도둑거저리 성충의 이산화염소 노출 후 보행거리 및 보행속도를 곤충행동측정기(EthoVision XT, Version 9.0, Noldus Information Technology, Wageningen, Netherland)로 분석하였다. 행동분석용 경기장은 직경 55 mm의 페트리디쉬를 이용하였으며, 중앙부위에 1.5 mL E-tube 뚜껑을 놓고 여기에 이산화염소(800 ppm) 액체 또는 인산완충용액 200 µL를 올려놓았

다. 전체 행동은 5 분간 관찰되었고, 각 처리에는 30 마리의 개체로 반복하였다. 처리 기간 동안 온도는 25°C, 상대습도는 40% 이었다.

### 이산화염소 훈증 처리

이산화염소는 전기분해 방식으로 제조하였다. 물에 녹여놓았다가 가스 형태로 훈증시키는 것이기 때문에 농도조절이 가능하였고 이를 아크릴판으로 특수 제작한 밀폐된 챔버에 가스 발생장치(푸르고팜, 화성, 대한민국)를 이용하여 투여했다. 시험 곤충은 50 mL 튜브에 소량(약 10개) 현미와 함께 투여되었다. 이 용기의 윗면은 망사로 씌어 훈증제 처리가 가능하게 하였다. 이 곤충 용기를 이산화염소 처리 챔버에 넣고 처리 기간 동안 가스누출검지기(Gas leak detector C16, Analytical technology, Colleagueville, PA, USA)로 이산화염소 농도를 지속적으로 모니터링해서 처리 농도를 확인했다.

### 이산화염소에 대한 거짓쌀도둑거저리의 감수성 분석

이산화염소 농도 처리는 0, 100, 200, 400 및 800 ppm을 이용하였다. 각 농도 처리는 3 반복으로 24 시간 노출시켰다. 처리 후 25°C 실내 조건에서 72 시간 방치 후 사망률을 조사하였다. 유충과 성충의 사망 판정은 핀셋으로 복부를 가볍게 눌렀을 때 자의적 행동이 없는 상태로 규정하였다. 번데기의 사망 판정은 흉부를 핀셋으로 잡았을 때 복부의 움직임이 없는 상태로 규정하였다.

### 열처리와 복합처리

열처리는 항온수조를 이용하여 46°C의 열처리가 실시되었다. 공시충은 10 mL 먹이가 채워진 50 mL 튜브에 15 마리씩 처리되었다. 항온수조의 물이 튜브의 뚜껑 부위까지 차도록 처리하였다. 뚜껑 부위는 망사로 대체하였다. 이 항온수조를 이산화염소 훈증제 처리 챔버 내부로 옮겨 무처리와 400 ppm 이산화염소 처리를 각각 6 시간 및 12 시간 동안 실시하였다. 동일 조건에서 이산화염소 단독 처리는 항온수조 밖의 이산화염소 처리 챔버 내부에서 동시에 실시되었다. 각 처리는 3 반복으로 실시되었다.

### 통계분석

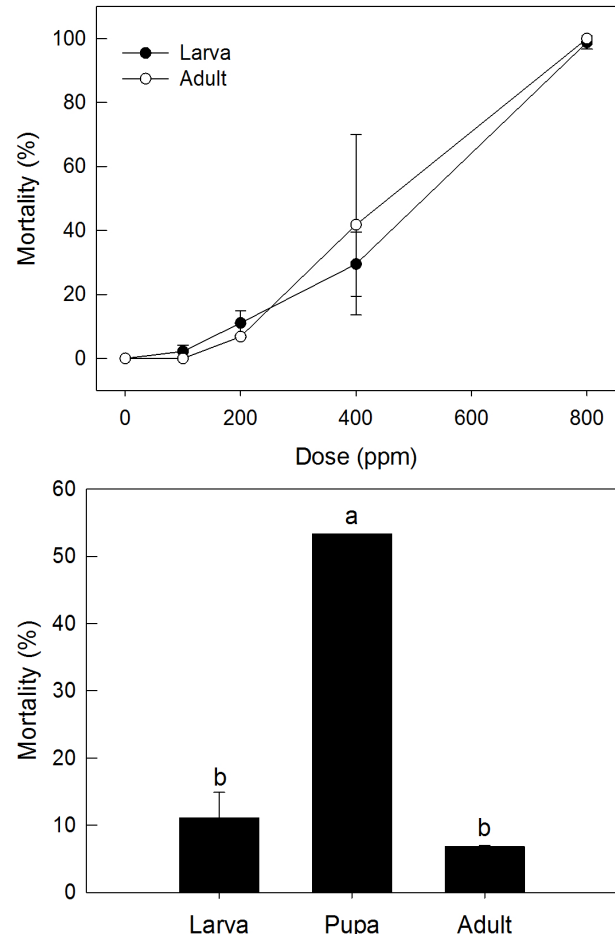
모든 살충효과 실험결과는 백분율 자료로서 arcsine 변환 후

SAS의 PROC GLM (SAS Institute, 1989)을 이용하여 ANOVA 분석 및 처리 평균 간 비교를 실시하였다.

## 결과

### 거짓쌀도둑거저리에 대한 이산화염소의 독성

이산화염소 훈증제 처리에 대한 거짓쌀도둑거저리의 감수성을 분석하였다(Fig. 1A). 거짓쌀도둑거저리에 대한 이산화염소는 처리 농도( $F = 196.10$ ;  $df = 4, 22$ ;  $P < 0.0001$ )에 따라 뚜렷한 독성을 주었다. 이러한 이산화염소의 농도별 독성 증가는 유충과 성충 모두에 대해서( $F = 0.06$ ;  $df = 4, 22$ ;  $P = 0.3083$ ) 유사하게 나타났다. 그러나 발육시기에 따라 이산화염소에 대한 감수성이 상이하여(Fig. 1B), 유충과 성충에 비해 번데기가 높은 감수성( $F = 0.54$ ;  $df = 2, 22$ ;  $P < 0.0001$ )을 나타냈다. 거짓쌀



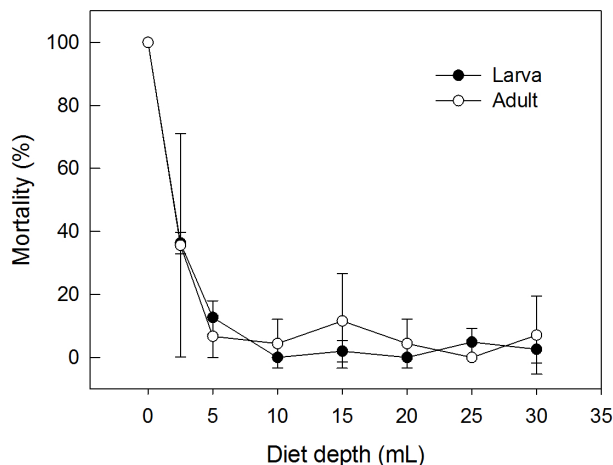
**Fig. 1.** Toxicity of chlorine dioxide (12 h exposure) against *T. castaneum*. (A) Dose-mortality curves in larvae and adults. (B) Variation in susceptibility to chlorine dioxide (200 ppm). Each measurement consisted of 15 individuals and was replicated three times. Different letters above standard deviation bars indicate significant difference among means at Type I = 0.05 (LSD test).

도둑거저리에 대한 이산화염소의 반수치사농도(LC<sub>50</sub>)는 유충에 대해 383.67 ppm (153.63 - 955.78 ppm: 95% 신뢰구간), 성충에 대해 397.75 ppm (354.46 - 446.13 ppm: 95% 신뢰구간)을 보였다.

### 회피행동에 따른 이산화염소 독성 저하

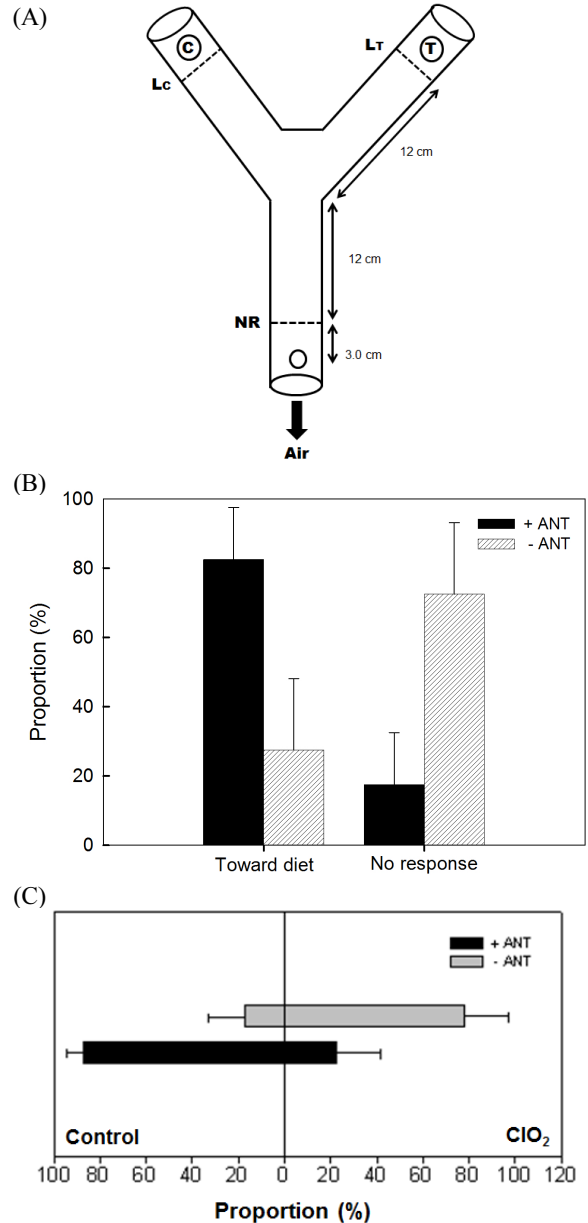
밀가루 먹이를 다양한 부피로 처리 튜브에 채워주었을 때 이산화염소에 대한 거짓쌀도둑거저리의 감수성은 유충과 성충 모두의 회피행동에 따라 크게 감소하였다(Fig. 2). 이러한 감수성 저하는 공급된 먹이량( $F=49.0$ ;  $df=7, 32$ ;  $P<0.0001$ )에 비례하여 뚜렷이 나타났다. 이러한 경향은 유충과 성충 모두에서 유사하게( $F=0.82$ ;  $df=7, 32$ ;  $P=0.5773$ ) 나타났다. 특별히 먹이량이 5 mL 이상의 경우(약 2 cm 이상 깊이)에서는 거의 처리 효과를 나타내지 못하였다.

거짓쌀도둑거저리가 이산화염소를 회피하는 지를 분석하기 위해 Y 튜브 생물검정을 실시하였다(Fig. 3). Y 튜브 양쪽 말단에 곤충의 먹이를 각각 두었다(Fig. 3A). 처리구는 800 ppm 이산화염소를 처리하였고, 대조구는 동일한 부피의 인산완충용액을 처리하였다. 이때 거짓쌀도둑거저리 가운데 먹이 쪽으로 움직이는 행동 반응을 보인 개체가 약 82%를 차지하였다(Fig. 3B). 그러나 촉각을 제거한 경우 무반응을 보이는 개체가 전체의 약 77%를 차지하였다. 먹이 쪽으로 반응을 보인 정상적 개체 가운데는 이산화염소가 처리되지 않은 쪽으로 약 88%가 움

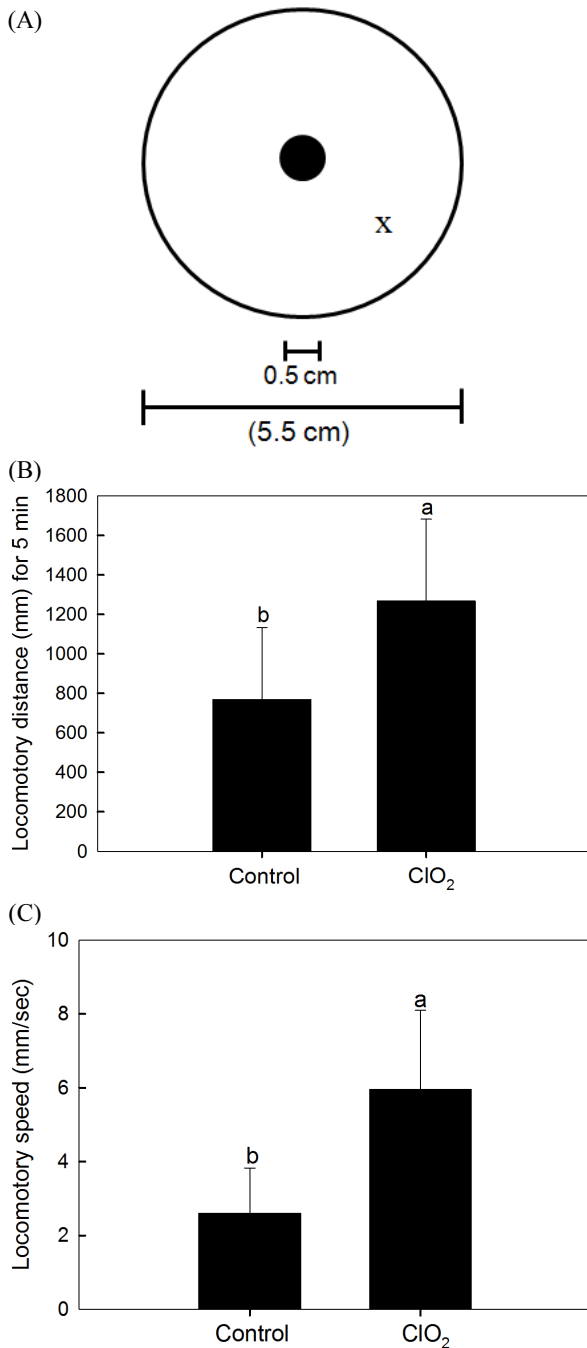


**Fig. 2.** Decrease of chlorine dioxide (200 ppm for 24 h) toxicity against *T. castaneum* with increase of diet amount. Each measurement consisted of 15 individuals in 50 mL tube and was replicated three times. Diet depth indicates the volume of the diet in the test tube. 5 mL equals about 2 cm in depth. Different letters above standard deviation bars indicate significant difference among means at Type I = 0.05 (LSD test).

직였다(Fig. 3C). 그러나 촉각이 제거된 거짓쌀도둑거저리는 대부분 먹이에 대한 감지 능력을 잃었고, 일부 반응을 보인 개체들은 오히려 이산화염소 처리된 곳으로 치우쳐져서 대조구 대비 이산화염소에 대한 감지능력( $\chi^2=35.6$ ;  $df=2$ ;  $P<0.0001$ )

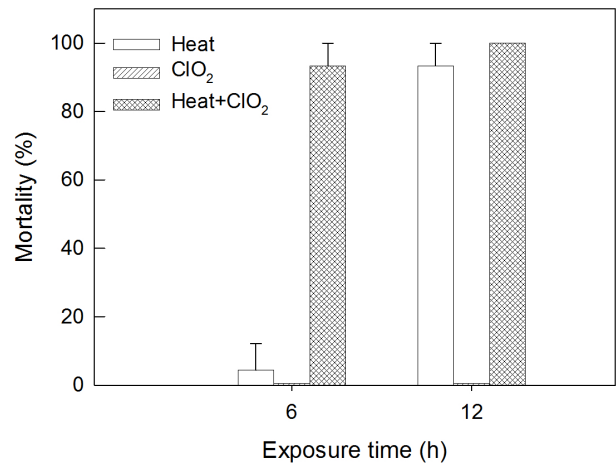


**Fig. 3.** Behavior test of *T. castaneum* adults against chlorine dioxide (ClO<sub>2</sub>) against *T. castaneum* adults using Y tube. (A) Diagram of Y tube: C (control), T (test chemical: ClO<sub>2</sub>), Lc: threshold line for control, Lt: threshold line for test chemical, NR: threshold line for no response. Small circle indicates the starting point of test insects. Each run used 10 adults. (B) Effect of antennae on the orientation behavior to the diet in the Y tube: +ANT (with antennae) and -ANT (without antennae). Each treatment was replicated three times. (C) Effect of chlorine dioxide on the preference behavior of the responsive individuals. Each treatment was replicated three times.



**Fig. 4.** Stimulation of chlorine dioxide on the locomotory behavior of *T. castaneum* adults. (A) Diagram of test arena. 'X' indicates a test insect. (B) Walking distance for 5 min. (C) Walking speed. Each treatment was replicated 20 times. Different letters above standard deviation bars indicate significant difference among means at Type I = 0.05 (LSD test).

을 잃었다. 이러한 회피행동은 이산화염소 처리에 따라 증가된 보행행동 속도와 거리 증가에서도 뒷받침하고 있다(Fig. 4).



**Fig. 5.** Synergistic effect of heat (46°C) on insecticidal activity of chlorine dioxide (400 ppm) against *T. castaneum* adults. Each treatment was replicated 20 times. Different letters above standard deviation bars indicate significant difference among means at Type I = 0.05 (LSD test).

### 열처리와 혼합에 따른 이산화염소 독성 회복

이산화염소에 대한 거짓쌀도둑거리의 감수성 저하는 먹이 속으로 파고 들어가면서 이산화염소 노출을 회피하는 행동에서 기인한 것으로 관찰되었다. 이러한 회피행동을 줄이기 위해 열처리를 병행하였다(Fig. 5). 열처리 단독으로는 6 시간 처리에서 약 4.4% 살충력을 보였고, 12 시간을 처리한 결과 93.3% 살충력을 보였다. 그러나 400 ppm의 이산화염소를 처리한 결과 두 시간 처리 모두에서 전혀 살충력을 나타내지 못했다. 그러나 두 처리를 병행한 경우 6 시간 처리에서 약 95%의 살충력을 나타내 두 처리의 뚜렷한 시너지효과( $F = 160.82$ ;  $df = 2, 12$ ;  $P < 0.0001$ )를 나타냈다. 그리고 12 시간을 처리한 두 처리 병행은 완전 방제효과를 나타냈다.

### 고찰

이산화염소는 병원성 세균 및 바이러스에 대해 넓은 항생능력을 보이고 있다. 즉, 이산화염소는 식품 오염 병원세균류(Bang et al., 2014; Sun et al., 2014), 구강 오염세균류(Taneja et al., 2014; Aung et al., 2015), 음용수 오염세균류(Vlad et al., 2014) 및 일반 식기 오염세균류(Nam et al., 2014)에 대해서 우수한 항생능력을 보였다. 특별히 여러 항생제에 대해서 내성을 보이는 세균류에 대해서 이산화염소는 기존의 차아염소산나트륨( $\text{NaClO}$ )에 비해 탁월한 항생능력을 나타냈다(Hinenoya et al., 2015). 또한 이산화염소는 수족구병을 유발하는 엔테로바이러스 71 (EV71)을 비롯한 다양한 인체 병원바이러스에 대해서 항바이

러스 활성을 나타냈다(Sanekata et al., 2010; Jin et al., 2013).

최근 기체 상태로 훈증 처리가 가능한 이산화염소는 위생해충 및 저곡해충에 대한 살충력을 나타낼 수 있다. 병원 시설에 발생하는 빈대류(*Cimex lectularius*, *Cimex hemipterus*)에 대해서 비교적 높은 농도(약 1,000 ppm)의 이산화염소 노출에 대해서 속효성의 방제 효과를 나타냈으며(Gibbs et al., 2012), 저곡류를 가해하는 화랑곡나방(*Plodia interpunctella*)에 대해서도 비교적 낮은 농도(200 ppm)의 노출에서 완전방제 효과를 나타냈다(Kumar et al., 2015).

본 연구는 이산화염소 훈증 처리를 거짓쌀도둑거저리에 적용한 결과 직접 노출 조건에서 살충효과를 갖는 것을 보여주었다. 이산화염소 훈증 처리를 12 시간 지속시킨 결과 약 383-397 ppm의 처리 농도에서 유충과 성충에 대해서 반수치사농도를 보였다. 그러나 이산화염소에 대한 감수성은 발육시기별로 차이가 있어 동일한 조건의 이산화염소 처리에서 번데기에 비해 유충과 성충이 약제 내성이 높은 것으로 나타났다. 이산화염소의 살충효과는 이 물질이 갖는 높은 산화력에 기인한 것으로 보인다. Kumar et al. (2015)은 이산화염소를 화랑곡나방에 처리한 결과 혈구세포에 대한 세포독성을 보인 것을 밝혔다. 이러한 세포독성은 이산화염소 처리에 따라 높은 농도로 발생하는 활성산소에 기인한 것으로 판명되었다. 따라서 발육시기별로 이산화염소에 대한 감수성의 차이를 보인 것도 이들의 활성산소 발생 능력에 차이가 있는 것으로 사료된다. 이를 증명하기 위해서 발육시기별 활성산소의 발생량 변화를 추적할 필요가 있다.

이산화염소의 살충력은 거짓쌀도둑거저리의 회피행동에 의해 둔화되었다. 먹이인 밀가루를 제공한 결과 이산화염소 노출에 따라 먹이 속으로 파고들어가는 회피행동을 보였다. 먹이를 1 cm 깊이로 제공한 경우 살충력은 급격하게 떨어졌고, 2.5 cm 이상으로 제공한 결과 거의 살충효과를 나타내지 못하였다. 이는 기체 상태의 이산화염소가 1 cm 깊이의 밀가루 먹이 속으로 유효한 침투력을 발휘하지 못한다는 것을 의미한다. 거짓쌀도둑거저리의 회피행동은 Y 튜브 검정에서도 뚜렷한 회피를 보이는 행동에서도 뒷받침되었다. 반면, 이산화염소 처리는 거짓쌀도둑거저리의 보행속도를 증가시켰다. 이는 아마도 이산화염소 노출에 따라 회피행동 반응을 자극하는 데에서 기인된다. 거짓쌀도둑거저리는 일반적으로 자신에게 해로운 물질에 대해서 회피행동을 보일 수 있다. 예를 들어, 식물 정유에 포함된 테르펜류는 거짓쌀도둑거저리에 대해서 살충효과를 주는데, 이러한 물질을 감지하는 개체들은 기피행동을 보이고 있다(Khan et al., 2014; Wua et al., 2014). 이산화염소도 살충효과를 보이고, 이에 대해 거짓쌀도둑거저리는 회피행동을 보인 것으로 해석된다. 이러한 물질 감지는 거짓쌀도둑거저리의 촉각에서 기

인되었다는 것이 본 연구의 촉각 제거 실험에서 증명되었다. 추후 이 촉각에 위치한 화학감각기의 동정이 요구된다.

열처리에 따라 이산화염소에 대한 거짓쌀도둑거저리의 회피행동이 억제되었다. 거짓쌀도둑거저리에 대해서 46°C의 고온 처리는 살충효과를 주었고, 이 가운데 유충보다는 성충이 열에 대한 내성을 보여 주었다(Son et al., 2010). 본 연구에서 이용한 46°C 고온에서 6 시간 처리한 결과 살충력은 10% 미만이지만, 12 시간 처리하면 거의 90% 이상의 살충효과를 나타냈다. 이러한 열처리에 대해서 거짓쌀도둑거저리 성충은 고온을 감지한 것으로 보인다. 이는 이 온도에 대해서 성충들이 먹이 밖으로 나온 행동에서 뒷받침된다. 비교적 밀가루 먹이 내부보다는 먹이 밖에서 기문이나 구강을 통해 기화열 발산이 용이하기에 이들 성충이 먹이 밖으로 나온 것으로 추정된다. 거짓쌀도둑거저리의 온도 감지에 대해서 최근 TRPs (transient receptor potential channels) 감각기가 밝혀졌다. 노랑초파리에서 알려진 TRPs 유전자들과 1:1 대응으로 후보유전자들이 밝혀졌고, 이 가운데 *trpA1* 유전자의 경우는 고온 감지에 관여하는 것으로 기능 분석되었고, *painless*와 *pyrexia* 유전자들은 고온 적응에 관여하는 유전자로 추정되고 있다(Kim et al., 2015). 본 연구에서 보인 열에 대한 행동 변화는 *trpA1* 유전자 산물이 관여하여 46°C의 고온을 감지하여 이뤄진 것으로 추정된다. 물론 여기에 *painless*와 *pyrexia* 유전자들은 고온 적응행동에 관여하였을 것으로 추정된다. 반면 이산화염소 농도를 400 ppm으로 올려서 거짓쌀도둑거저리에 처리한 결과, 6 시간과 12 시간 노출 모두에서 전혀 살충효과를 나타내지 못하였다. 이는 이들 성충이 모두 약제를 회피하여 먹이 속으로 숨는 행동에서 기인되었다. 그러나 고온도 함께 이산화염소를 처리한 결과 방제효과가 크게 증가하였다. 이는 이 곤충이 고온을 감지하는 능력과 더불어 적응하는 행동이 발휘되어 이산화염소에 대한 회피행동을 억제시킨 것으로 해석된다. 즉, 이산화염소 노출에 따른 먹이 속으로 회피행동이 열처리에 따라 고온 적응 행동으로 바뀌어 오히려 먹이 밖으로 나오게 함으로 약제에 직접 노출되면서 약효를 증가시킨 것으로 해석된다.

본 연구 결과는 고온 처리가 이산화염소에 대한 거짓쌀도둑거저리의 회피행동을 억제하는 것으로 나타났고, 이러한 효과가 이 약제의 살충력을 증가시킨다는 가설을 뒷받침하고 있다.

## 사 사

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

## Literature Cited

- Aung, E.E., Ueno, M., Zaitso, T., Furukawa, S., Kawaguchi, Y., 2015. Effectiveness of three oral hygiene regimes on oral malodor reduction: a randomized clinical trial. *Trials* 16, 31.
- Bang, J., Hing, A., Kim, H., Beuchat, L.R., Rhee, M.S., Kim, Y., Ryu, J.H., 2014. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in biofilm on food-contact surfaces by sequential treatments of aqueous chlorine dioxide and drying. *Int. J. Food Microbiol.* 191, 129-134.
- 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. pp. 171-198, *In Quarantine treatments for pests and food plants*, eds. by J.L. Sharp, G.J. Hallman. Westview, Boulder, CO, USA.
- Choi, K.M., Lee, M.H., Han, M.J., Ahn, S.B., Hong, K.J., 1996. Stored product insect pests with pictorial key to larvae. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea.
- 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.
- Hinenoya, A., Awasthi, S.P., Yasuda, N., Shima, A., Morino, H., Koizumi, T., Fukuda, T., Miura, T., Shibata, T., Yamasaki, S., 2015. Chlorine dioxide is a superior disinfectant against multi-drug resistant *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* and *Acinetobacter baumannii*. *Jpn. J. Infect. Dis.* In press.
- 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.
- Jin, M., Shan, J., Chen, Z., Guo, X., Shen, Z., Qiu, Z., Xue, B., Wang, Y., Zhu, D., Wang, X., Li, J., 2013. Chlorine dioxide inactivation of enterovirus 71 in water and its impact on genomic targets. *Environ. Sci. Technol.* 47, 4590-4597.
- Kells, S.A., Mason, L.J., Maier, D.E., Woloshuck, C.P., 2001. Efficacy and fumigation characteristics of ozone in stored maize. *J. Stored Prod. Res.* 37, 371-383.
- Khan, A., Islam, M., Rahman, M., Zaman, T., Haque, M., 2014. Pesticidal and pest repellency activities of a plant derived triterpenoid 2 $\alpha$ ,3 $\beta$ ,21 $\beta$ ,23,28-pentahydroxyl 12-oleanene against *Tribolium castaneum*. *Biol. Res.* 47, 68.
- Kim, H.G., Margolies, D., Park, Y., 2015. The roles of thermal transient receptor potential channels in thermotactic behavior and in thermal acclimation in the red flour beetle, *Tribolium castaneum*. *J. Insect Physiol.* 76, 47-55.
- Kumar, S., Park, J., Kim, E., Na, J., Chun, Y.S., Kwon, H., Kim, W., 2015. Oxidative stress induced by chlorine dioxide as an insecticidal factor to the Indian meal moth, *Plodia interpunctella*. *Pesti. Biochem. Physiol.* In press.
- Liu, Y.B., 2003. Effects of vacuum and controlled atmosphere treatments on insect mortality and lettuce quality. *J. Econ. Entomol.* 96, 1100-1107.
- 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*. *Kor. J. Appl. Entomol.* 45, 363-369.
- Nam, H., Seo, H.S., Bang, J., Kim, H., Beuchat, L.R., Ryu, J.H., 2014. Efficacy of gaseous chlorine dioxide in inactivating *Bacillus cereus* attached to and in a biofilm on stainless steel. *Int. J. Food Microbiol.* 188, 122-127.
- 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., Drake, S.R., 2000. Comparison of alternative quarantine treatments for sweet cherries. *Postharvest Biol. Technol.* 20, 107-114.
- Paull, R.E., Armstrong, J.W., 1994. *Insect pests and fresh horticultural products: treatments and responses*. CAB International, Wallingford, UK.
- Sanekata, T., Fukuda, T., Miura, T., Morino, H., Lee, C., Maeda, K., Araki, K., Otake, T., Kawahata, T., Shibata, T., 2010. Evaluation of the antiviral activity of chlorine dioxide and sodium hypochlorite against feline calicivirus, human influenza virus, measles virus, canine distemper virus, human herpesvirus, human adenovirus, canine adenovirus and canine parvovirus. *Biocontrol Sci.* 15, 45-49.
- SAS Institute, Inc. 1989. SAS/STAT user's guide, release 6.03, Ed. Cary, N.C.
- Sharp, J.L., Hallman, G.J., 1994. *Quarantine treatments for pests and food plants*. Westview, Boulder, CO, USA.
- Son, Y., Kim, Y., Kim, Y., 2010. Control effect of a stored grain insect pest, *Tribolium castaneum*, by 'CATTS' postharvest treatment. *Kor. J. Appl. Entomol.* 49, 363-369.
- Sun, X., Bai, J., Ference, C., Wang, Z., Zhang, Y., Narciso, J., Zhou, K., 2014. Antimicrobial activity of controlled-release chlorine dioxide gas on fresh blueberries. *J. Food Prot.* 77, 1127-1132.
- Taneja, S., Mishra, N., Malik, S., 2014. Comparative evaluation of human pulp tissue dissolution by different concentrations of chlorine dioxide, calcium hypochlorite and sodium hypochlorite: an *in vitro* study. *J. Conserv. Dent.* 17, 541-545.
- 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.
- USDA. 2005. Integrated management of insect pests in stored grain and in processed grain products. Annual Project Report: the Biological Research Unit, Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture.

---

Vlad, S., Anderson, W.B., Peldszus, S., Huck, P.M., 2014. Removal of the cyanotoxin-a by drinking water treatment processes: a review. *J. Water Health* 12, 601-617.

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.

Wua, Y., Chenb, H.P., Wei, J.Y., Yang, K., Tian, Z.F., Li, X.L., Wang, P.J., Wang, C.F., Du, S.S., Cai, Q., 2014. Repellent constituents of essential oil from *Citrus wilsonii* stem barks against *Tribolium castaneum*. *Nat. Prod. Commun.* 9, 1515-1518.