

스트레스 음파에 따른 파밤나방(*Spodoptera exigua*) 소화 및 면역 생리작용 저하와 살충제 감수성 제고 효과

박정아 · 석정균 · Surakasi Venkara Prasad · 김용균*

안동대학교 자연과학대학 생명자원과학과

Sound Stress Alters Physiological Processes in Digestion and Immunity and Enhances Insecticide Susceptibility of *Spodoptera exigua*

Jung-A Park, Jungkyun Seok, Surakasi Venkara Prasad and Yonggun Kim*

School of Bioresource Science, College of Natural Science, Andong National University

ABSTRACT: This study analyzed effects of different sound treatments in frequencies and intensities on digestion and immune physiological processes of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* larvae. Without effect on egg hatch, sound treatments with 100-5,000 Hz at 95 dB suppressed feeding behavior and inhibited a digestive enzyme activity. In addition, two dimensional electrophoresis of midgut luminal proteins indicated a marked difference of the sound-treated larvae. In response to 5,000 Hz at 95 dB, larvae showed a significant decrease in hemocyte nodule formation against fungal challenge along with significant suppression in phospholipase A₂ activity in hemocyte and plasma. With increase of sound frequencies, the treated larvae showed an enhanced susceptibility to insecticides. Such sound frequency effect was significantly modulated with different sound intensities. These results suggest that sound treatment may give adverse stress to physiological processes of *S. exigua* larvae and may be applied to a nonchemical insect pest control.

Key words: *Spodoptera exigua*, Sound, Immune, Digestion, Insecticide, PLA₂

초 록: 본 연구는 상이한 음파 처리에 따라 파밤나방(*Spodoptera exigua*) 유충의 소화와 면역 생리반응에 대한 교란 효과를 분석하였다. 조사한 모든 주파수의 음파 처리가 파밤나방 산란에는 뚜렷한 효과를 주지 않았지만, 95 dB 소리세기에서 100-5,000 Hz 주파수의 음파 처리는 유충의 섭식량을 저하시키고, 중장의 소화효소 활성을 억제시켰다. 이 스트레스 음파 처리에 따른 중장 내강에 존재하는 단백질을 이차원전기영동으로 분리하였으며, 무처리구와 상이한 단백질 패턴을 발견하였다. 또한 가장 스트레스 효과를 크게 주는 95 dB의 5,000 Hz 주파수 음파 처리를 받은 유충은 곰팡이 감염에 대해서 혈구의 소낭형성이 억제되었다. 이 음파 처리 받은 유충의 혈구와 혈장에서 인지질분해효소(phospholipase A₂: PLA₂)의 활성은 현격하게 감소하였다. 스트레스 음파 처리에 따라 파밤나방 유충은 살충제에 대한 감수성이 증가했다. 이러한 상이한 주파수에 따른 생리교란 효과는 소리세기의 차이에 따라 뚜렷하게 차등을 보였다. 이러한 결과는 음파처리가 파밤나방의 생리과정에 스트레스를 주어 비화학적 해충 방제 관리 기술 개발에 적용될 수 있다고 본 연구는 제시한다.

검색어: 파밤나방, 음파, 면역, 소화, 살충제, PLA₂

파밤나방(*Spodoptera exigua*)은 작물의 피해 기주 범위가 넓고, 폭식성으로 전작물에 심각한 경제적 피해를 주는 해충이다(Gho *et al.*, 1991; Kim *et al.*, 2007, 2009a). 비록 국내 파

밤나방 집단의 정확한 이동 시기와 경로가 밝혀져 있지 않지만, 장거리 이동성이 가능한 곤충으로 알려져 매년 작물 재배 기간에 월동이 가능한 남부 지역으로부터 국내 전역에 전파되는 것으로 여겨지고 있다(Mikkola, 1970; Kang and Kim, 2001). 휴면 기작을 보유하고 있지 않은 파밤나방은 높은 내한성으로 시설 재배지를 중심으로 월동이 가능하여 최근 들어

*Corresponding author: hosanna@andong.ac.kr

Received January 19 2011; Revised February 14 2011;

Accepted February 15 2011

피해 범위와 정도가 증가하는 것으로 알려지고 있다(Song *et al.*, 1997). 연중 다세대 발생을 일으키는 파밤나방의 빠른 증식율에(Gho *et al.*, 1993) 무분별한 화학 농약의 살포는 이들 가운데 저항성 개체의 선발이 비교적 용이하게 이뤄져 대부분의 화학농약에 대해서 농약 저항성을 보이는 것으로 알려지고 있다(Kim *et al.*, 1997; Byrne and Toscano, 2001; Squevers *et al.*, 2008).

화학 농약을 대체하려는 다양한 비화학적 방제 기술이 파밤나방에 적용되었다. 생물농약으로서 파밤나방에 높은 방제 효과를 나타내는 새로운 *Bacillus thuringiensis* (Bt) 균주를 탐색하였다(Kim *et al.*, 2009b). 또한 기존의 Bt 약제의 효과를 높이기 위해 천연물 유래 협력제 개발이 시도되었다(Jin *et al.*, 2009). 이 Bt제는 화학농약과 교호처리제로 사용하여 화학농약에 대한 약제 저항성 발달을 낮추는 데에도 이용되었다(Kim *et al.*, 2009c). 또 다른 생물 농약으로 파밤나방에 특이적 바이러스병을 일으키는 *Spodoptera exigua* nucleopolyhedrosis virus가 선발되어 뚜렷한 방제 효과를 나타냈다(Kim *et al.*, 2004). 그러나 이 벡콜로바이러스를 생산하는 데 높은 비용 때문에 경제성을 갖지 못하고 있다. 성페로몬을 이용하여 성충의 교미교란을 통해 방제하려는 기술이 개발되어 시도되었으나(Park, 1995), 이 곤충의 높은 이동력으로 인한 광범위 적용이라는 현실적 문제로 보편화되지 못하였다.

본 연구는 다양한 비화학적 해충방제 기술 가운데 스트레스 음파를 이용한 물리적 해충 방제 기술을 고안하였다. 소리를 이용한 통신은 자극원 탐지능력이 비교적 낮고 에너지 비용이 높은 단점을 갖고 있지만, 냄새통신과 유사하게 교신범위가 비교적 넓고 장애물 처리능력에서 우수한 특성을 지닌다(Alcock, 1979). 스트레스 음파에 대한 연구는 척추동물을 중심으로 연구되었다. 쥐의 경우 급성 스트레스 음파에 대해서 스트레스성 무통각증(antinociception)을 유발하는 반면, 장시간 스트레스 음파노출에 대해서는 반대로 만성통증(fibromyalgin) 또는 류마티스 관절염을 유발하여 스트레스 음파가 신경계와 면역계에 해로운 영향을 줄 수 있다고 밝혔다(Khasar *et al.*, 2005).

본 연구는 음파처리에 따라 파밤나방의 소화와 면역작용에 있어서 뚜렷한 변화를 주는 지를 분석하였다. 또한 소화효소 및 소화관 내에 단백질 분석을 통해 스트레스 음파에 따른 파밤나방의 생리적 변화를 분자 수준에서 분석했다. 또한 스트레스 음파의 면역작용에 대한 영향은 혈구세포의 소낭형성 및 이를 유발하는 인지질 분해 효소 활성 분석을 통해 수행하였다. 끝으로 이러한 스트레스 음파 노출에 따라 파밤나방이 살충제에 대해서 감수성 변화가 있는지 분석하였다.

재료 및 방법

파밤나방 사육

인공사료(Gho *et al.*, 1990)로 파밤나방 유충을 사육하였다. 성충은 10% 설탕물을 공급받았다. 전체 사육기간 동안 온도 25±1°C, 상대습도 60±10%, 광주기 16:8 h (L:D)의 조건을 유지시켰다.

음파처리

음파처리는 목재 재질로 된 나무상자(45 × 45 × 90 cm)에 기기 내부에 소리 반향을 줄이기 위해 방음판을 내부에 부착시켰다. 음파발생기는 MP3기기(GT206, Green Teko, Inc., Suwon, Korea)를 이용하였고, 음파상자 상단에 스피커(GTS20, Green Teko)를 부착시켜 바닥을 향해 소리가 전달되게 했다. 전달되는 소리의 세기는 데시벨 측정기(Minilyzer ML1, NTI, Schaan, Switzerland)로 상자 바닥에 닿는 소리세기를 측정하였다. 이 바닥에 파밤나방 유충이 가해하는 배추잎을 올려놓고 실내온도 25°C에서 0, 100, 315, 630, 1,000, 2,000 및 5,000 Hz의 음파를 24 시간 처리하여 생리변화를 관찰하였다. 각 반복은 10 마리로 각 처리당 3 반복으로 실험을 진행하였다.

음파처리에 따른 섭식량 측정

파밤나방 5령충을 대상으로 주파수는 95 dB로 고정하고 0, 100, 315, 630, 1,000, 2,000 그리고 5,000 Hz의 음파에서 24 시간 동안 노출시켜 섭식량 차이를 조사하였다. 섭식량 조사시 먹이는 배추 잎을 이용하였으며, 처리 전후의 무게 차이로 산출하였다. 자연 감소된 배추잎 무게를 산출하기 위해 동일한 조건에서 처리 전후 시간 사이에 감소된 배추 무게 차이를 산출하였다. 각 처리는 10마리씩 3반복 실시하였다.

PLA₂ 효소 활성 측정

파밤나방 5령 유충의 증장을 추출하여 상피세포층과 소화관 내강 물질을 분리하였다. 중장 상피세포층은 인산완충용액(100 mM phosphate, 0.7% NaCl, pH 7.4)으로 세척한 후 동일한 완충 용액에서 조직을 분쇄하고 단백질을 추출하였다. 추출액은 14,000 rpm의 원심분리로 상등액을 얻고, 이를 다시 인산완충용액으로 희석하여 효소활성 측정에 이용하였다. 중장 내강 물질은 14,000 rpm의 원심분리로 상등액을 얻은 후 다시 인

산원충용액으로 희석하여 효소활성에 이용하였다. 추출 용액의 단백질 함량은 bovine serum albumin (BSA)을 표준용액으로 Bradford (1976) 방법으로 정량 분석하였다.

PLA₂ 측정은 인지질 기질로서 pyrene 형광물질이 sn-2 위치에 표식된 1-hexadecanoyl-2-(1-pyrene decanoyl)-sn-glycerol-3-phosphatidyl choline (Molecular Probes, Eugene, OR, USA)을 이용하였다. 이 기질을 에탄올에 녹여 10 mM이 되도록 준비하였다. 10% BSA는 증류수로 조제했다. 각 반응용액(2 mL)은 50 mM Tris-HCl 완충용액 (pH 7.0, 1,946 µL), 10% BSA (20 µL), 1 M CaCl₂ (12 µL) 그리고 단백질 추출물(20 µL)를 차례로 혼합하였다. 이후 기질(2 µL)을 첨가한 후 10분 동안 반응시켰다. 이때 분광형광도계(Aminco Bowman Series 2 Luminescence Spectrophotometer, FA257, Spectronic Instruments, USA)를 이용하여 345 nm의 조사선에 대해서 나타나는 형광을 398 nm에서 검출하였다. 이때 PLA₂ 효소활성은 Radvanyi *et al.* (1989)의 계산법으로 산출하였다.

혈구세포 소낭형성 반응 분석

파밤나방 5령 2일째 유충을 5 마리씩 3반복으로 5,000 Hz 스트레스 음파에 24시간 노출시켰다. 무처리구는 음파처리 없이 동일한 조건에 방치하였다. 곤충병원성곰팡이(*Beauveria bassiana*)의 포자를 10⁶ cfu/mL로 준비한 후 음파에 노출시킨 파밤나방 유충에 5 µL 혈장 주사하였다. 음파에 노출시키지 않은 파밤나방은 증류수 5 µL를 주사하였다. 이후 동일한 온도 조건(25°C)에서 8시간 처리한 후 혈장에 존재하는 소낭을 관찰하였다.

혈구세포 소낭은 처리된 유충을 절개한 후 소화관 주변 및 지방체에 붙어 있는 흑갈색 소형 덩어리로서(Park and Kim, 2000) 해부현미경(SZX9, Olympus, Tokyo, Japan)을 이용하여 50x 배율에서 관찰하였다.

살충제 생물검정

화학농약의 제품성분은 fenvalerate (스미사이딘™ 수화제, 동방아그로)와 *B. thuringiensis* subsp. *aizawai* (젠타리™ 수화제, 영일케미컬)로서 각 농도별로 희석하여 현탁액을 제조하였다. 이 현탁액에 배추잎(2 × 2 cm)을 10분간 침지시킨 후 여과지가 깔려진 용기에서 5분간 건조시켰다. 각 처리된 배추잎에 파밤나방 3령충을 10마리씩 접종하고 동일한 농도 처리를 3반복으로 실시하였다. 처리 24시간 후 무처리 배추잎을 제공하고 24 시간 주기로 5일 동안 생존수를 계수하였다. 대조구는 살균

수로 상기와 동일하게 처리하였다.

이차원 전기영동 분석

스트레스 음파(5,000 Hz, 95 dB)로 파밤나방 5령 유충을 24시간 처리한 후, 중장 내장 물질을 상기의 방법으로 추출하였다. 이 추출액을 10% trichloroacetic acid에서 단백질을 침강시켜, 침전 단백질을 시료완충용액(8 M urea, 4% CHAPS, 3-[(3-cholamidopropyl) dimethylammonio]-1-propanesulfonate, IPG buffer pH 3-10, 40 mM dithiothreitol (DTT))으로 용해시켰다. 이 수용성 단백질은 Bradford 분석법으로 정량화하였다.

이차원 전기영동은 Ettan IPGphor II IEF System (GE Healthcare, Uppsala, Sweden)을 이용해 분석했다. 이때 isoelectric focusing (IEF)은 시료 단백질량을 300 µg으로 고정하고 100 V에서 1시간 처리 후 500 V에서 1시간, 다시 1 kV에서 1시간, 2 kV에서 2시간, 4 kV에서 2시간, 6 kV에서 1시간, 8 kV에서 8시간 등 총 16시간 진행했다. IEF 용 막대젤(13 cm, pH gradient 3-10, Immobiline Drystrip, GE Healthcare)을 이용하였다. 변성 SDS-PAGE로 진행하기 전에 IEF 막대젤은 SDS 평형완충용액(6 M urea, 75 mM Tri-HCl, pH 8.8, 2% SDS, 0.002% bromophenol blue, 10 mg/mL DTT)에 15분간 침지하였다. 비변성 조건에 포화된 IEF 막대젤은 0.7% agarose 용액으로 12.5% SDS-PAGE 젤에 부착되었다. 이후 10 mA/gel로 1시간 전기영동이 실시되고 이후 25 mA/gel로 5시간 추가로 단백질 분리가 실시되었다. 전기영동 후 젤은 silver 염색법(Bio-Rad, Hercules, CA, USA)으로 제조사의 사용 방법에 따라 분리 단백질이 검출되었다.

자료분석

백분율 자료 결과는 arcsine 변환 후 SAS의 PROC GLM (SAS Institute, 1989)을 이용하여 ANOVA 분석을 실시하였다. 자료의 도형화는 Sigma Plot 8.0 (Systat Software, Inc., Point Richmond, CA, USA)을 이용하여 도식화하였다.

결 과

상이한 음파 처리에 따른 파밤나방 섭식 생리 변화

파밤나방 발육과 면역 반응에 영향을 주는 스트레스 음파를 결정하기 위해 0-5,000 Hz 범위의 음파를 95 dB 소리세기로 처리하였다. 파밤나방 알에 처리한 결과 음파 주파수에 따라 부화율에 영향을 미치지 않았다(미보고자료). 그러나 파밤나방 5령

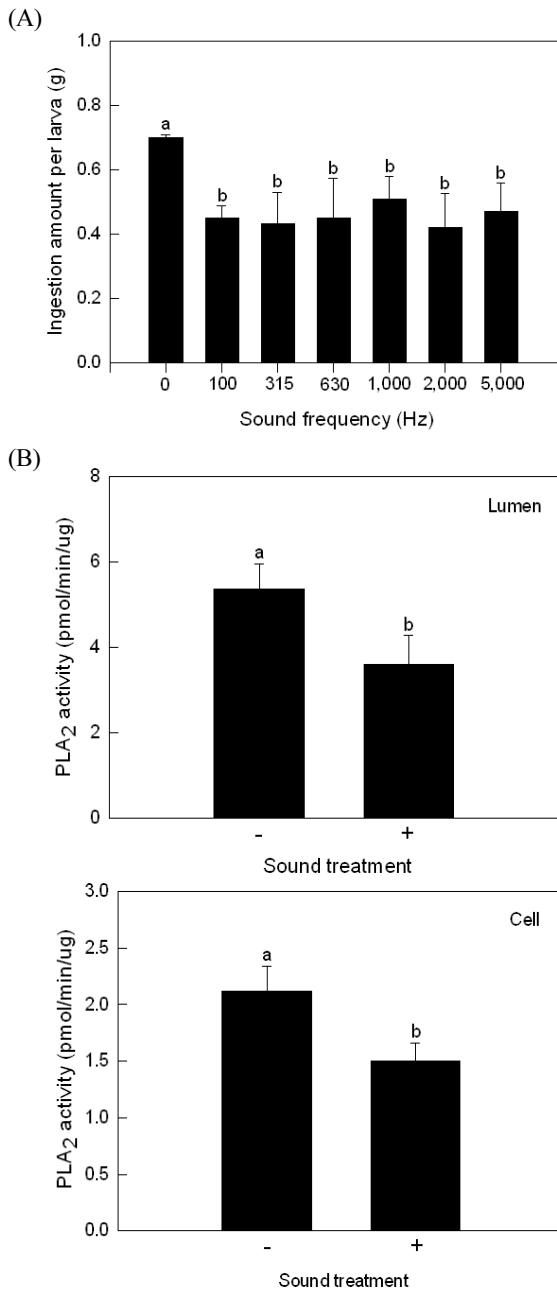


Fig. 1. Effect of sound treatment on digestion of *Spodoptera exigua* larvae. (A) Feeding behavior. At 95 dB, different sound frequencies were applied to fifth instar larvae for 24 h at 25°C. Chinese cabbage was supplied at diet. Each treatment consisted of 10 larvae and was replicated three times. (B) PLA₂ activity in midgut epithelium (cell) and luminal juice (lumen). After the sound treatment with 5,000 Hz, the larval midgut was isolated and separated into cell and lumen. Each treatment consisted of five individual midgut and was replicated three times. Different letters above standard deviation bars indicate significant difference among means at Type I error = 0.05 (LSD test).

충을 대상으로 24 시간 동안 서로 다른 음파에 노출한 결과 처리 주파수의 음파에 따라 섭식량 저하를 유발시켰다(Fig. 1A).

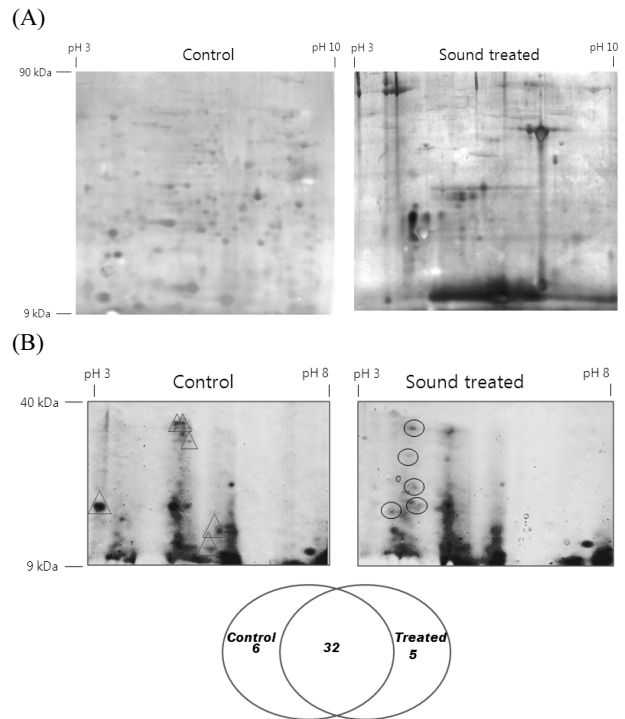


Fig. 2. Effect of sound treatment (95 dB, 5,000 Hz, 24 h) on proteins in the midgut epithelium (A) and luminal digestive juice (B) of fifth instar larvae of *Spodoptera exigua*. Triangles and circles indicate specific luminal proteins of control and sound treatment larvae, respectively. Each treatment used 200 µg proteins extracted from 50 larval tissues.

음파 처리에 따른 소화 효소 활성화에 미치는 영향을 규명하고자 동일한 95 dB 소리세기에서 5,000 Hz의 음파를 24 시간 처리 후 중장 내 존재하는 PLA₂ 효소 활성을 비교하였다(Fig. 1B). 이때 대조구에 비해 중장세포와 중장 내강에 존재하는 PLA₂의 활성 모두가 음파 처리에 따라 현격하게 감소하였다. 중장 내강에 존재하는 단백질의 종류를 2차원 전기영동으로 분리해서 음파처리에 따른 효과를 비교했다(Fig. 2). 중장 상피세포에는 다수의 단백질들이 존재했다(Fig. 2A). 대조구에 비해 음파 처리구는 전체 단백질 밀도에서 감소를 보였다. 더욱이 음파 처리구는 중성 pI 영역에서 다량의 소형 단백질이 나타나, 이들이 음파 처리에 따른 단백질 분해 산물로 보였다. 중장 내강의 단백질들은 비교적 소형(40 kDa)이며, 스트레스 음파 처리는 특이적 단백질들을 보여 주었으나 전체적 밀도는 대조구와 비교하여 다소 감소했다(Fig. 2B).

상이한 음파 처리에 따른 파밤나방 면역 생리 변화

2섭식 생리 변화를 유도한 스트레스성 음파(5,000 Hz, 95 dB)를 파밤나방 5령충에 24 시간 처리한 후 세포성 면역반응

변화를 분석하기 위해 *B. bassiana* 포자를 혈장에 주입하였다 (Fig. 3A). 대조구의 경우 약 35개의 소낭이 혈장에 나타난 반면 이러한 스트레스성 음파 처리를 받은 유충의 경우 불과 약 10개의 소낭이 형성되어 현격하게 줄어든 세포성 면역 반응을 나타

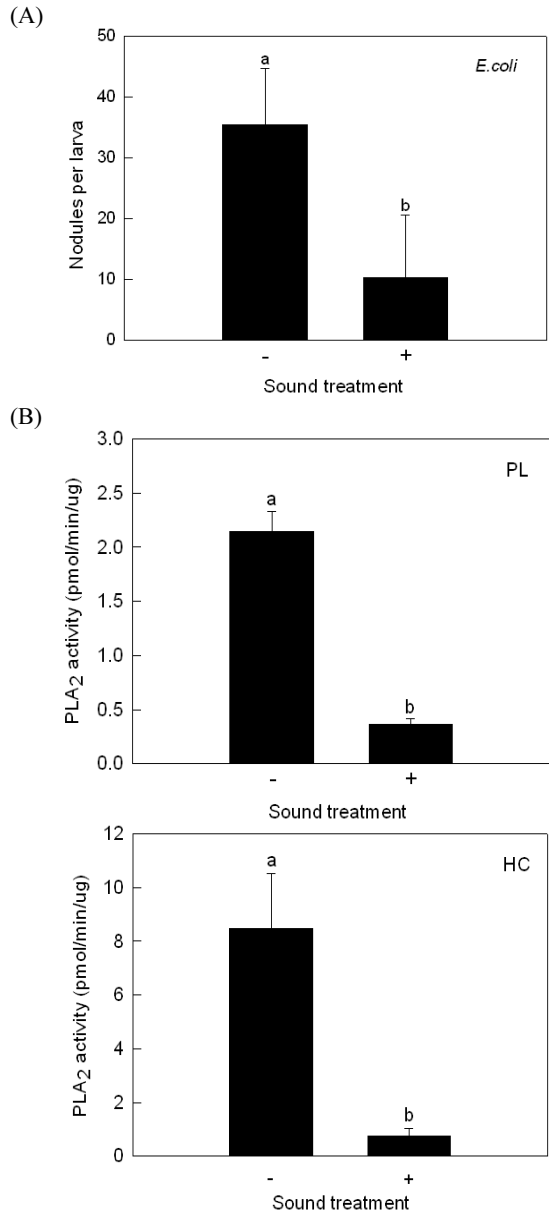


Fig. 3. Effect of sound treatment (95 dB, 5,000 Hz, 24 h) on immune response of fifth instar *Spodoptera exigua*. (A) Nodule formation. sound-treated larvae were injected with 5.0×10^3 spores of *Beauveria bassiana*. After 8h at 25°C with the additional sound or control treatment, the nodules were counted. Each treatment used 10 larvae. (B) After the sound treatment, hemocytes and plasma were collected and analyzed in PLA₂ activity. Each treatment consisted of five individual and was replicated three times. Different letters above standard deviation bars indicate significant difference among means at Type I error = 0.05 (LSD test).

났다. 이러한 소낭형성의 반응 차이를 알아보기 위해 혈구세포와 혈장에 존재하는 PLA₂ 활성을 비교 분석하였다(Fig. 3B). 이 효소 활성은 혈구나 혈장 모두에서 검출되었으며, 혈장에 비해 혈구세포에서 높은 PLA₂ 활성을 보였다. 스트레스성 음파 처리를 받은 개체는 대조구에 비해 두 조직 모두에서 현격하게 낮은 PLA₂ 활성을 나타냈다.

스트레스 음파가 살충제 감수성에 미치는 영향

스트레스 음파에 따라 나타난 소화 및 면역생리 저하는 살충제에 대한 감수성 증가로 이어질 수 있다는 가설에 따라 작용기작이 상이한 화학농약(fenvalerate)과 생물농약(Bt) 처리에 따른 감수성 변화를 조사하였다(Fig. 4). 화학농약의 경우 5,000 Hz 처리에서 대조구에 비해 높고 감수성 증가를 보이는 반면, 생물농약의 경우 2,000 Hz 이상에서 감수성 증가를 보였다.

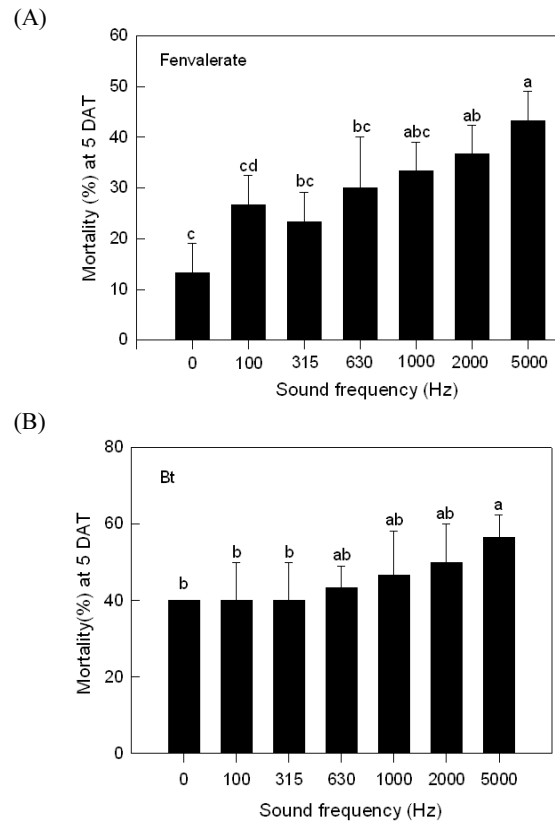
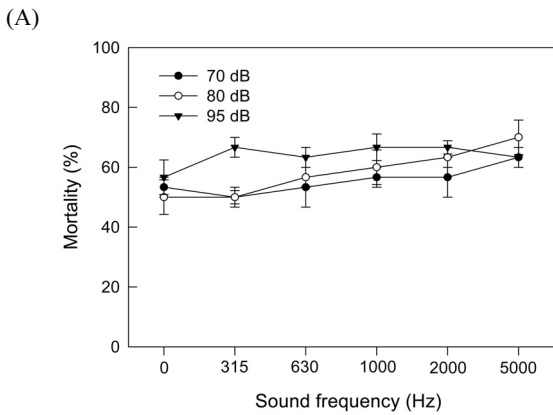


Fig. 4. Effect of different sound treatments on susceptibility of *Spodoptera exigua* to two insecticides. Third instar larvae were treated with cabbage leaves soaked in 62.5 ppm of fenvalerate or 125 ppm of *Bacillus thuringiensis* (Bt). The treated larvae were exposed to the different sound frequencies. Each treatment consisted of 10 larvae and was replicated three times. Mortality was measured at 5 days after treatment (DAT). Different letters above standard deviation bars indicate significant difference among means at Type I error = 0.05 (LSD test).



(B)

Source	df	SS	MS	F	P
Intensity	2	0.07	0.04	4.19	0.02
Frequency	5	0.10	0.02	2.34	0.06
Intensity x Frequency	10	0.01	0.001	11.47	0.001
Error	46	0.40	0.01		

Fig. 5. Combined effect of sound intensity and frequency. (A) Effect of different sound treatments on susceptibility of *Spodoptera exigua* to *Bacillus thuringiensis* (Bt). Third instar larvae were treated with cabbage leaves soaked in 125 ppm of Bt. The treated larvae were exposed to the different sound frequencies and intensities. Each treatment consisted of 10 larvae and was replicated three times. Mortality was measured at 5 days after treatment. (B) ANOVA of the mortality data.

소리세기에 따른 살충제 감수성에 대한 음파 처리 효과의 변화

일정 소리 세기와 주파수(95 dB, 5,000 Hz)에서 나타난 살충제 감수성증가에 대한 음파 처리 효과를 다양한 소리세기와 주파수를 적용하여 상대적 효과를 비교하였다(Fig. 5A). 처리 살충제를 Bt를 이용하였을 때 상이한 주파수의 효과 보다는 소리세기에 대해 더욱 민감하게 살충제 저하를 유도하는 것으로 나타났다. 또한 이들의 상관관계가 유의성이 있는 것으로 미뤄 각 주파수에서 상이한 소리세기에 따라 나타난 생리 교란 효과 차이는 상이한 주파수에 따라 변동될 수 있다는 것을 의미했다(Fig. 5B).

고찰

본 연구는 파밤나방의 소화 및 면역 생리 작용에 대해서 서로 다른 주파수의 음파 처리 효과를 분석했다. 파밤나방 5령충을 95 dB 세기의 음파에서 100-5,000 Hz 주파수 모두 섭식활동을 억제시켰다. 특별히 가장 높은 주파수인 5,000 Hz를 처리하였을 때 중장세포와 중장내강에 존재하는 소화 효소 가운데 하

나인 PLA₂의 인지질 분해 능력이 저하되었다. PLA₂는 주로 세포막에 존재하는 인지질을 분해하여 지방산과 lysophospholipid로 분해시킨다(Valentin and Lambeau, 2000). 유리된 지방산은 영양분으로 흡수되고 lysophospholipid는 다른 지질 분해효소에 의해 분해된다. 한편, 곤충은 다른 동물과 달리 특별히 분화된 쓸개즙을 분비하지 않아 비누화 물질인 lysophospholipid가 쓸개즙의 역할을 담당하여 지질 소화에 관여한다고 추정되고 있다(Stanley, 2006). 따라서 PLA₂활성 저하는 전체적 지질 산화작용 저하를 초래할 수 있다. 직접적인 예로서 파밤나방 중장에 존재하는 PLA₂를 특이적 억제자로 억제한 경우 유충의 발육 저하 및 사망을 초래했다(Kim and Kim, 2011). 따라서 본 결과는 특정 음파가 파밤나방 소화를 억제하는 스트레스 인자로 작용할 수 있음을 제시하고 있다.

이러한 스트레스 음파는 파밤나방의 면역 작용을 억제시켰다. 스트레스 음파가 처리되는 조건에서 파밤나방이 세균 침입을 받으면 음파 처리 없는 대조구에 비해 현격하게 낮은 소낭형성능력을 보였다. 이러한 파밤나방의 혈구 소낭형성을 면역 존재 물질이고 아이코사노이드에 의존한다(Park and Kim, 2000). 아이코사노이드는 탄소수 20개의 불포화지방산으로 인지질에서 PLA₂의 작용으로 아라키도닉산이 유리되면 다양한 산화효소를 통해 다양한 아이코사노이드를 생합성하게 된다(Six and Dennis, 2000). 스트레스 음파는 파밤나방 혈구의 PLA₂ 활성을 억제시켰다. 즉, 스트레스 음파는 아이코사노이드 생합성을 억제시킨 결과를 초래했으며, 이에 따라 이 물질에 의존적인 소낭형성 능력이 저하되었을 것으로 사료된다.

스트레스 음파에 따라 파밤나방 소화 및 면역 생리작용의 저하는 이 해충의 생존력에 영향을 주었을 것이고 또한 살충제와 같은 외부 물질에 대한 방어능력이 떨어지는 결과를 초래할 수 있다. 이를 증명하기 위해 신경독 작용을 보이는 fenvalerate와 생물농약인 Bt를 처리해서 파밤나방의 살충제 감수성을 분석하였을 때 모두 감수성이 증가하는 결과를 초래하였다. Fenvalerate는 피레스로이드 살충제로서 체내 또는 산화효소(monooxygenase)에 의해 극성을 높여 체외로 방출 시키게 되는 저항능력을 파밤나방이 보유하고 있다. 본 연구에서는 분석되지 않았지만 음파처리에 따른 fenvalerate에 대한 감수성 증가는 스트레스 음파가 파밤나방의 단일 산화효소의 합성을 저해시켰을 가능성을 내포하고 있다. 또한 Bt에 대한 감수성 증가는 앞에서 기술한 스트레스 음파처리에 따른 파밤나방의 면역 저하와 연관이 있는 것으로 판단된다. 이는 파밤나방에 대한 PLA₂ 억제 인자를 이용하여 면역 저하는 Bt의 살충력 제고를 보였던 연구(Kwon and Kim, 2008)가 뒷받침하고 있다.

이상의 결과는 파밤나방에 대해 특정한 음파는 일상 곤충 생

리과정에 스트레스 인자로서 작용할 수 있다는 것을 보였다. 또한 이러한 스트레스 음파를 궁극적으로 파밤나방의 외부 저항력을 약화시켜 살충제에 효과를 제고 시키는 협력 처리 기술로 응용할 수 있다고 본 연구는 제시한다.

사 사

본 연구는 2010년도 농촌진흥청 아젠다과제에서 지원한 연구과제로 수행되었다. 음파 처리 시설을 대여하여 준 (주)그린테코에 감사의 말씀을 드립니다.

Literature Cited

- Alcock, J. 1979. *Animal Behavior: An Evolutionary Approach*. 2nd ed. Sinauer Associates, Sunderland, MA, USA.
- Bradford, M.M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding. *Anal. Biochem.* 71: 248-254.
- Byrne, F.J. and N.C. Toscano. 2001. An insensitive acetylcholinesterase confers resistance to methomyl in the beet armyworm *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae). *J. Econ. Entomol.* 94: 524-528.
- Gho, H.G., J.S. Choi, K.B. Eum, K.M. Choi and J.H. Kim. 1993. Seasonal fluctuation of beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner), adult and larva. *Kor. J. Appl. Entomol.* 32: 389-394.
- Gho, H.G., S.G. Lee, B.P. Lee, G.M. Choi and J.H. Kim. 1990. Simple mass-rearing of beet armyworm, *Spodoptera exigua*. *Kor. J. Appl. Entomol.* 29: 180-183.
- Gho, H.G., J.D. Park, Y.M. Choi and I.S. Park. 1991. The host plants of beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner), (Lepidoptera: Noctuidae) and its occurrence. *Kor. J. Appl. Entomol.* 30: 111-116.
- Jin, N.Y., S.Y. Jung, C. Park, S.K. Paek, Y.N. Yoon and Y.M. Yu. 2009. The synergy effects of mixed treatment with tannic acid and *Bacillus thuringiensis* subsp. *kurstaki* KB100 against *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae). *Kor. J. Appl. Entomol.* 48: 519-526.
- Kang, S. and Y. Kim. 2001. Genetic variation of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner), populations in Korea using polymorphic allozymes. *Kor. J. Appl. Entomol.* 40: 235-243.
- Khasar, S.G., P.G. Green and J.D. Leine. 2005. Repeated sound stress enhances inflammatory pain in the rat. *Pain* 116: 79-86.
- Kim, J. and Y. Kim. 2011. Three metabolites from an entomopathogenic bacterium, *Xenorhabdus nematophila*, inhibit larval development of *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) by inhibiting a digestive enzyme, phospholipase A₂. *Insect Sci.* DOI 10.1111/j.1744-7917.2010.01363.x.
- Kim, S.G., D.I. Kim, S.J. Ko, B.R. Kang and K.J. Choi. 2007. Control thresholds for the management of beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) on welsh onion (*Allium fistulosum* L.). *Kor. J. Appl. Entomol.* 46: 431-435.
- Kim, S.G., D.I. Kim, S.J. Ko, B.R. Kang, H.J. Kim and K.J. Choi. 2009a. Determination of economic injury levels and control thresholds for *Spodoptera exigua* on Chinese cabbage. *Kor. J. Appl. Entomol.* 48: 81-86.
- Kim, S.G., J.D. Park, D.I. Kim, H.K. Choi, S.S. Kim and I.C. Hwang. 2004. Effects of different temperatures on pathogenicity of *Spodoptera exigua* nucleopolyhedrovirus (SeNPV). *Kor. J. Appl. Entomol.* 43: 329-332.
- Kim, T.H., D.A. Kim, K.S. Kim, M.J. Seo, Y.N. Yoon and Y.M. Yu. 2009b. Characterization of *Bacillus thuringiensis* subsp. *aizawai* CAB109 isolate with bioactivities to *Spodoptera litura* and *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae). *Kor. J. Appl. Entomol.* 48: 509-517.
- Kim, T.Y., S.K. Paek, J.S. Kim, S.Y. Choi, C. Park, T.H. Kim, N.Y. Jin, S.Y. Jung, Y.N. Yoon and Y.M. Yu. 2009c. Environment-friendly control of beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) to reduce insecticide use. *Kor. J. Appl. Entomol.* 48: 253-261.
- Kim, Y., J. Lee, S. Kang and S. Han. 1997. Variation in insecticide susceptibilities of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner): esterase and acetylcholinesterase activities. *Kor. J. Appl. Entomol.* 36: 172-178.
- Kwon, B. and Y. Kim. 2008. Benzylideneacetone, an immunosuppressant, enhances virulence of *Bacillus thuringiensis* against beet armyworm (Lepidoptera: Noctuidae). *J. Econ. Entomol.* 101: 36-41.
- Mikkola, K. 1970. The interpretation of long range migration of *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae). *J. Anim. Ecol.* 39: 593-598.
- Park, J.D. 1995. Control of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* Hübner (Lepidoptera: Noctuidae), using synthetic sex pheromone. II. Control using mating disruption dispensers in field. *Kor. J. Appl. Entomol.* 34: 169-173.
- Park, Y. and Y. Kim. 2000. Eicosanoids rescue *Spodoptera exigua* infected with *Xenorhabdus nematophilus*, the symbiotic bacteria to the entomopathogenic nematode, *Steinernema carpocapsae*. *J. Insect Physiol.* 46: 1469-1476.
- Radvanyi, F., L. Jordan, F. Russo-Marie and C. Bon. 1989. A sensitive and continuous fluorometric assay for phospholipase A₂ using pyrene-labeled phospholipids in the presence of serum albumin. *Anal. Biochem.* 177: 103-109.
- SAS Institute, Inc. 1989. *SAS/STAT User's Guide*, Release 6.03, Ed. Cary, NC, USA.
- Six, D.A. and E.A. Dennis. 2000. The expanding superfamily of phospholipase A₂ enzymes: classification and characterization. *Biochem. Biochim Biophys. Acta* 1488: 1-19.
- Song, W., Y. Kim, J.R. Cho, H.S. Kim and J.O. Lee. 1997.

-
- Physiological factors affecting rapid cold hardening of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner). Kor. J. Appl. Entomol. 36: 249-255.
- Sqevers, L., T. Soin, H. Mosallanejad, K. Iatrou and G. Smagghe. 2008. Ecdysteroid signaling in ecdysteroid-resistant cell lines from the polyphagous noctuid pest *Spodoptera exigua*. Insect Biochem. Mol. Biol. 38: 825-833.
- Stanley, D.W. 2006. Prostaglandins and other eicosanoids in insects: biological significance. Annu. Rev. Entomol. 51: 25-44.
- Vanlentin, E. and G. Lambeau. 2000. Increasing molecular diversity of secreted phospholipase A₂ and their receptors and binding proteins. Biochim. Biophys. Acta 1488: 59-70.