



이미다클로프리드 저항성 벼멸구의 살충제 교차저항성과 두 종류 벼 품종(친농과 추청)에서의 발육특성

정인홍* · 전성욱 · 이상구 · 박부용 · 박세근 · 이상범 · 최낙중¹ · 이시우² · 이시혁³ · 권덕호³

국립농업과학원 농산물안전성부 작물보호과, ¹국립식량과학원 작물기초기반과

²국립식량과학원 중부작물부 재배환경과, ³서울대학교 농업생명과학연구원

Insecticide Cross-resistance and Developmental Characteristics on the Two Rice Varieties, ‘Chinnong’ and ‘Chuchung’, of the Imidacloprid-resistant Brown Planthopper

In-Hong Jeong*, Sung-Wook Jeon, Sang-Ku Lee, Bueyong Park, Se-Keun Park, Sang-Bum Lee,
Nak Jung Choi¹, Si-Woo Lee², Si Hyeock Lee³ and Deok Ho Kwon³

Division of Crop Protection, National Institute of Agricultural Science, RDA, Jeollabuk-do 55365, Republic of Korea

¹Crop Foundation Research Division, National Institute of Crop Science, RDA, Jeollabuk-do, 55365, Republic of Korea

²Crop Environment Research Division, National Institute of Crop Science, RDA, Suwon 16429, Republic of Korea

³Research Institute of Agriculture and Life Science, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

(Received on October 17, 2017. Revised on November 5, 2017. Accepted on November 10, 2017)

Abstract The purpose of this study is to analyze the growth characteristics of imidacloprid resistant brown planthopper (BPH) on the two rice varieties (BPH resistant variety, Chinnong and BPH susceptible variety, Chuchung). The mortalities of resistant- and susceptible- strains were 2.7% and 100% after 72 hr treatment in the recommended concentration (RC, 20 ppm) of imidacloprid, respectively, and the LC₅₀ of resistant strain revealed 17.8 fold higher than that of susceptible strain. Moreover, the resistant strain revealed the cross resistance against four neonicotinoids (acetamiprid, clothianidin, thiamethoxam and thiacloprid), but not for carbamate (fenobucarb), pyrethroid (etofenprox) and sulfoxamine (sulfoxaflor) insecticides. In the comparison of development characters on life table between susceptible and resistant strain for two rice varieties, the resistant strain which was reared on Chinnong variety showed low nymphal period, female longevity, fecundity, net reproduction rate (R₀), intrinsic rate of increase (r_m) and high doubling time (D₁). The results indicate that the cultivation of BPH resistant variety would be an effective strategy in the imidacloprid-resistant BPH management.

Key words BPH-resistant rice variety, Chinnong, Imidacloprid, Insecticide-resistant, *Nilaparvata lugens* Stål

서 론

벼멸구(*Nilaparvata lugens* Stål)는 우리나라를 비롯해 동남아시아, 중국, 일본 등 벼 재배지역에 광범위하게 분포하면서 벼 생산에 있어 경제적 피해를 주는 대표적인 해충으로, 국내에서는 월동을 하지 못하고 6월말부터 7월초 사이

에 중국이나 동남아로부터 비래 한 후, 2-3세대를 거치면서 피해를 준다(Choi, 1998). 벼멸구는 벼의 줄기에 산란하고 수액을 빨아먹어 직접적으로 식물체에 피해를 주고 심한 경우에는 집중고사현상(hopper burn)을 일으키며, 필리핀 등 열대지역에서는 벼 바이러스 Rice grassy stunt virus (RGSV) 나 Rice ragged stunt virus (RRSV) 등을 매개하여 큰 피해를 주는 것으로 알려져 있다(Kishimoto, 1976; Cabauatan et al., 2009).

벼멸구의 방제는 수십 년 동안 화학적 살충제에 의존해

*Corresponding author
E-mail: ihjeong1@korea.kr

왔다(Endo and Tsurumachi, 2001). 초창기에는 DDT와 같은 유기염소계 살충제가 방제를 위해 도입되었으나, 이들 살충제는 비교적 독성이 강하고 높은 토양 잔류성으로 인해 생태계에 악영향을 주는 관계로 1970년대 이후 사용이 금지되었다(Nagata and Moriya, 1974). 이후 유기인계와 카바메이트계 살충제가 이를 대체하여 광범위하게 사용되었으나, 저항성 개체군의 발달로 방제의 효율성이 감소되고 있다. 이에 이러한 단점을 보완한 다양한 약제(예, 피레스로이드, 네오니코티노이드, 곤충생장조절제(IGR), 페닐피라졸)들이 새롭게 개발되었고, 벼멸구 방제에 광범위하게 활용되고 있다(Uchida et al., 1985; Gorman et al., 2008; Matsumura et al., 2008). 그러나 대상 살충제의 남용과 과용으로 인해 대부분의 살충제가 출시 초기부터 약제저항성 발달이라는 문제에 봉착하고 있으며, 최근 네오니코티노이드의 광범위 사용으로 열대지역 및 온대지역에서 저항성의 문제가 야기되고 있는 실정이다(Matsumura et al., 2009; Heong et al., 2011). 뿐만 아니라 2008년, 중국, 인도, 일본, 인도네시아, 말레이시아, 타이완, 태국, 베트남에서 실내실험을 통해 벼멸구 개체군이 이미다클로프리트(imidacloprid)에 저항성이 나타나고 있다는 것이 확인되었다(Gorman et al., 2008; Matsumura et al., 2009). 특히, 중국 농민들의 무분별한 약제사용으로 이미다클로프리트에 대한 벼멸구 저항성은 매우 심각한 문제가 되고 있는데(Cheng, 2009), 1996년부터 2006년까지, Wang et al. (2008)은 이미다클로프리트 저항성 조사를 하기 위해 중국 8개 지역에서 42개의 벼멸구 개체군을 수집하여 분석한 결과 2005년부터 매우 높은 수준의 저항성이 다수 지역에서 나타났다고 하였다. 최근 2012-2014년 채집한 벼멸구계통에 대해서는 지역에 따라서 저항성이 230~2030배 발달해 있었으며, 이는 일부 농가의 무분별한 약제 사용과 더불어 여전히 높은 농도의 살충제를 사용하고 있는 동남아시아지역에서 저항성 벼멸구의 꾸준한 유입에 의한 것으로 판단하고 있다(Zhang et al., 2015).

벼멸구의 약제방제 외에 또 다른 해결 방안으로는 벼멸구 저항성 품종의 육성 및 보급이다(Bonman et al., 1992). 지금까지 28개의 벼멸구 저항성 유전자가 보고되어 있으며(Fujita et al., 2013), 우리나라에서는 1977년 벼멸구 저항성 유전자(BPH resistant gene) *bph1*을 가진 통일형 ‘밀양30호’, 1986년 *bph2*를 가진 자포니카형 ‘화청’을 최초로 개발하였고 이후 *bph1* 또는 *bph2*를 활용한 전통적 계통육종법을 통한 품종개발 연구가 지속되어, 우리나라에서 육성된 *bph2* 유전자가 도입된 자포니카계 벼멸구저항성 품종은 ‘하남’(2005년 육성), ‘다청’(2009년 육성), ‘친농’(2011년 육성) 등이 있고, *Bph1* 유전자가 도입된 ‘중모1006’(2010년 육성)가 있다. 최근에는 야생벼로부터 유래된 Bph18 유전자를 가진 ‘안미’가 육성되었다(RDA, 2010). 그러나, 이십 년 동안 벼멸구의 저항성 품종에 대한 감염패턴과 생태형의 변화로

점점 감수성화 되고 있어(Li et al., 1999), 새로운 저항성 유전자를 가진 품종의 개발이 여전히 요구되고 있다.

최근 국내 벼멸구 집단의 약제감수성을 확인 한 결과, 이미다클로프리트 등 네오니코티노이드 계통 약제의 높은 저항성을 확인 되었다. 이는 중국 등 비래원에서 저항성을 획득한 벼멸구의 비래로 인한 것임을 확인 할 수 있었다(Min et al., 2014). 그러나 현재 재배되고 있는 벼 품종에 있어 저항성 벼멸구에 대한 저항성 행동반응 특성에 대한 연구가 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이미다클로프리트 저항성 벼멸구에 대한 살충제 감수성을 알아보고 저항성 벼 품종에서의 저항성 벼멸구 발육 및 수명, 산자수 등을 조사하고 이러한 자료를 토대로 생명표를 작성하여 약제저항성 벼멸구와 저항성 품종간의 생태학적인 특징을 확인하고자 하였다.

재료 및 방법

시험곤충 사육 및 살충제 도태

이미다클로프리트 저항성 벼멸구 계통은 2015년 9월 완도와 사천에서 채집한 계통을 혼합하여 누대 사육하면서 8회 살충제를 처리하여 도태 시킨 계통을 사용하였다. 살충제 도태는 사육 중인 벼 유묘에 이미다클로프리트 수화제를 적정농도로 희석하여 2일 간 침지 처리하였으며, 처리 농도는 약제의 추천농도의 1/4배(5 ppm)에서 처음 6회 실시하고, 1/2배(10 ppm)에서 1회, 끝으로 추천농도(20 ppm)에서 1회 실시하였다. 약제감수성 벼멸구 계통은 국립농업과학원 작물보호과에서 수년 동안 살충제에 노출되지 않은 누대 사육 중인 계통을 사용하였다.

실험약제

약제도태계통의 저항성 확인 및 교차저항성 검정을 위해 사용한 약제는 현재 시판 중인 네오니코티노이드계인 Imidacloprid (10% WP, 코니도, 바이엘크롭사이언스㈜), Acetamiprid (5% SL, 신엑스, (주)경농), Clothianidin (8% SG, 푹소리, (주)동방아그로), Dinotefuran (10% WP, 오신, (주)팜한농), Thiacloprid (10% SC, 칼립소, 바이엘크롭사이언스(주)), Thiamethoxam (10% WG, 아타라, 신젠타코리아(주))과 카바메이트계 Fenobucarb (50% EC, 밧사, (주)경농), 피레스로이드계 Etofenprox (20% EC, 세베로, (주)경농), 설폰사민계 Sulfoxaflo (7% WG, 스트레이트, (주)동방아그로) 모두 9종이었다.

살충제 도태 벼멸구의 생물검정 및 반수치사농도

생물검정은 벼멸구 3령충을 이용한 벼유묘침지법으로, 이 방법은 Zhang et al. (2014)의 벼줄기침지법(rice stem dipping method)을 응용하였으며 방법은 다음과 같다. 발아한 벼씨

(추청벼)를 수도용 상토에 파종한 후 3-4주 된 어린 유묘를 뽑아 잘 씻은 후, 뿌리가 있는 채로 줄기를 길이 7 cm로 자르고 음건하였다. 5개의 유묘 줄기를 한 그룹으로 하여 준비한 약제에 30초 동안 침지한 후, 상온에서 30분 이상 음건하였다. 약제가 처리된 줄기를 뿌리부분이 포함되게 물이 묻은 거즈로 감싸고 유리시험관(φ30 × h200 mm)에 장착하였다. 각각 유리시험관에 벼멸구 3령약충을 15마리씩 잡아 넣고, 24, 48, 72시간 후 각 사충수를 조사하였다. 배양조건은 25 ± 2°C, 상대습도 50~60%, 광조건 16L:8D였으며, 모든 시험은 5반복으로 실시하였다. 반수치사농도(LC₅₀)는 약제를 증류수에 순차적으로 희석하여 생물검정과 같은 방법으로 처리하고 48시간 후 사충수를 조사하였다.

생명표

이미다클로프리드 저항성 및 감수성 벼멸구 계통의 벼 품종에 대한 발육차이 분석을 위해 사용한 벼멸구 저항성 품종은 국립식량과학원에서 분양 받은 자포니카계 친농벼(벼멸구 저항성 유전자 *bph2* 보유, Shin et al., 2012)를 이용하였고, 벼멸구에 대한 감수성 품종은 국립농업과학원 포장에서 2015년 재배하여 수확한 자포니카계 추청벼를 사용하였다. 각각의 법씨를 발아기에서 발아시킨 후 수도용 상토를 이용하여 2주간 키워 3엽 이상의 어린 유묘를 사용하였다.

약충발육기간은 갓 부화한 어린 약충을 상기 벼 유묘 1개를 넣은 시험관에 1마리씩 넣고 성충이 될 때까지 매일 탈피각 유무를 관찰하여 약충 영기간을 조사하였다. 각 시험의 반복은 60반복이었으며, 약제감수성 벼멸구를 추청벼에 넣은 시험은 82반복이었다. 성충의 수명과 산자수는 상기 약충발육시험에서 성충으로 우화한 암수 1쌍을 벼 유묘가 들어있는 시험관에 접종하고, 암컷성충이 죽을 때까지 매일 새로운 시험관으로 옮겨주었고, 각 시험관에서 부화한 약충수와 미부화 난수를 조사하였으며, 처리간의 반복은 각각 20쌍이었다. 그리고 약충발육기간, 사망률, 성충수명, 산자수 및 성비를 이용하여 생명표를 작성하였다. 생명표의 매개변수 추정에는 생명표는 Meyer et al. (1986)가 제안한 Jackknife 방법을 이용하였고 SAS (SAS Institute, 1999)로 구하였다.

통계분석

시험해충의 약제반응 분석 및 생명표 작성에는 SPSS

13.0 (IBM Analytics)을 이용하여 probit analysis와 t-test를 수행하였다.

결과 및 고찰

이미다클로프리드 저항성 벼멸구의 약제 반응 조사

약제반응에 따른 벼멸구의 저항성 벼 품종에서의 적응력 차이를 알아보기 위하여 순차적 유묘침지 도태를 통하여 이미다클로프리드 저항성 계통을 만들고, 그 저항성 정도를 조사하였다. 저항성 및 감수성 벼멸구 계통에 이미다클로프리드 수화제를 추천농도인 20 ppm로 처리한 결과, 저항성 계통의 사망률은 24시간 후 0.0%, 48시간 후 1.3%, 72시간 후 2.7%이었으며 감수성 계통은 24시간 후 97.3%, 48시간 후 98.7%, 72시간 후 100%로 두 계통간의 큰 차이를 보여 주었다. 처리 72시간 후 반수치사농도(LC₅₀)에 있어서도 감수성계통은 25.51 ppm, 저항성계통은 453.00 ppm으로 저항성비가 17.76로 높은 저항성 발달을 확인할 수 있었다 (Table 1).

이미다클로프리드 저항성 벼멸구의 교차저항성

이미다클로프리드 저항성 벼멸구에 대한 멸구류 방제에 등록된 약제들의 교차저항성을 알아보기 위하여 네오니코티노이드계 약제 5종과 카바메이트계, 피레스로이드계, 설폭사민계 각1종에 대하여 생물검정을 실시하였다. 네오니코티노이드계 약제 처리 후 72시간에서의 살충률은 acetamiprid (25 ppm), clothianidin (16 ppm), dinotefuran (100 ppm), thiacloprid (50 ppm), thiamethoxam (10 ppm) 각각에 대하여 이미다클로프리드 감수성 계통은 90% 이상을 보였으나, 저항성 계통에서는 24.6%, 67.6%, 100%, 5.4%, 16.0%를 보였다. 특이할 만한 점은 같은 네오니코티노이드계 약제들 간에는 확실히 교차저항성을 보여 주고 있었으나, dinotefuran 만은 이미다클로프리드 저항성 벼멸구에 대하여 교차저항성을 보이지 않았다(Fig. 1). 이미다클로프리드 저항성 해충에 대한 dinotefuran의 다른 저항성 반응은 벼멸구 뿐만 아니라 목화진딧물(*Aphis gossypii* Grover), 담배가루이(*Bemisia tabaci* Gennadius) 등의 해충에서도 보고가 되었다(Prabhaker et al., 2005; Wang et al., 2008; Shi et al., 2011). Meng et al. (2016)은 일반적으로 네오니코티노이드계 살충제의 약제저항성 기작인 cytochrome p450에 의한 해독작용의 차이에서

Table 1. Mortality in recommended concentration, median lethal concentration (LC₅₀) and resistance ratio in LC₅₀ of Imidacloprid resistant and susceptible *N. lugens* strains after 48hr treatment

<i>N. lugens</i> strain	Mortality (%) in RC ^{a)}	LC ₅₀ (ppm)	Slope ± SE	df	χ ²	R/R ^{b)}
Resistant	1.3 ± 2.98	453.00	1.27 ± 0.24	2	0.053	17.76
Susceptible	98.7 ± 2.98	25.51	0.82 ± 0.14	4	4.871	1

^{a)} RC; Recommended concentration

^{b)} R/R (resistance ratio) = LC₅₀ of resistant / LC₅₀ of susceptible.

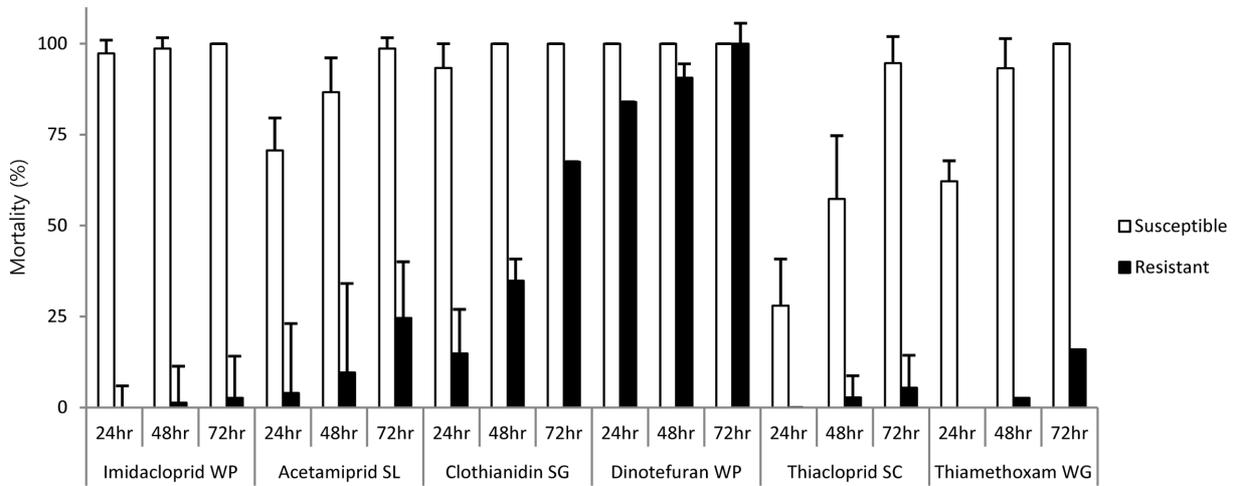


Fig. 1. Mortalities of susceptible- and imidacloprid resistant *N. lugens* against neonicotinoids insecticides for 24, 48, 72 hrs after treatment.

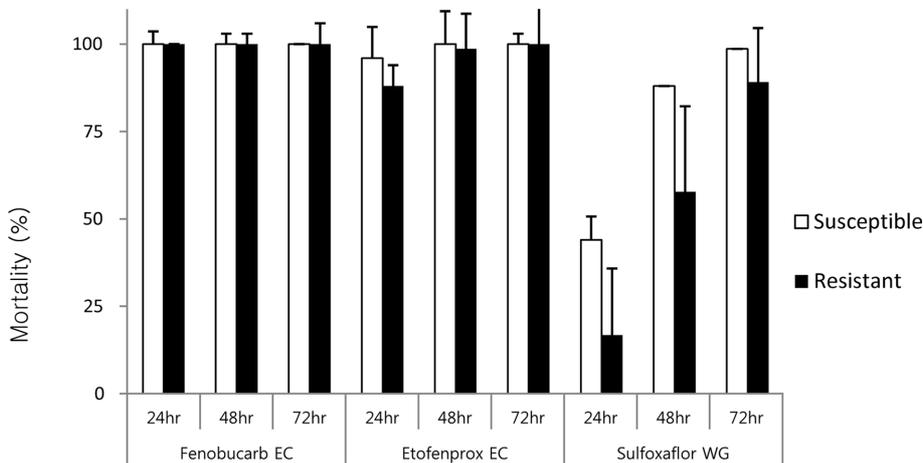


Fig. 2. Mortalities of susceptible- and imidacloprid resistant *N. lugens* against the other insecticides for 24, 48, 72 hrs after treatment.

원인을 찾고 있었다. 분자동력학적(Molecular dynamics) 시뮬레이션을 통하여 담배가루이 Q 형에서의 이미다클로프리드와 dinotefuran의 저항성 발현 차이를 두 화합물의 구조적 특징의 차이에 의한 CYM6CM1 단백질에서의 결합력의 차이로 인한 대사작용의 차이 때문이라고 밝혔다. 벼멸구에서의 두 약제에 대한 저항성 발현의 차이가 담배가루이에서와 동일한 차이에 의한 것인지는 보다 더 연구를 수행해 볼 필요가 있다. 네오니코티노이드 살충제 외에 카바메이트계인 fenobucarb (500 ppm), 피레스로이드계인 etofenprox (100 ppm), 설포사민계인 sulfoxaflor (14 ppm) 약제들에 대해서는 감수성계통과 저항성계통에서 80% 이상의 살충률을 보였으며, 이미다클로프리드 저항성 벼멸구에서 교차저항성을 확인할 수 없었다(Fig. 2). 따라서, 저항성 해충에 대한 방제를 위해서는 교차저항성이 낮은 약제의 교체사용이 권장되고 있으며 국내 비래 벼멸구의 이미다클로프리드 저항성이 확인된다면 네오니코티노이드 계통의 살충제의 사용은 지양하고 다른 기작의 살충제의 사용이 바람직하리라 사료된다.

이미다클로프리드 저항성 벼멸구의 벼멸구 저항성 벼에서의 발육 특성

약제저항성 해충의 해충저항성 품종에 대한 발육특성을 알아보기 위하여 해충은 이미다클로프리드 저항성 벼멸구와 감수성 벼멸구로 구분하고 벼 품종은 벼멸구 저항성 품종인 친농벼와 감수성 품종인 추청벼로 구분하여 살펴보았다. 이미다클로프리드 저항성 및 감수성 벼멸구계통의 각 암컷 성충들로 산란 받아 부화한 약충들을 친농벼와 추청벼에 접종하여 약충발육기간과 생존율을 차이를 살펴보았다(Table 2). 저항성 벼멸구가 감수성 벼멸구에 비하여 1령에서 발육기간이 약 1일 정도 짧았으나, 전체 약충기간에서는 통계적으로 유의하지는 않았다. 따라서 약제저항성 인자가 벼멸구 1령 약충기의 단축에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 품종 저항성의 경우, Saxena and Barrion (1984)은 벼 유묘를 이용하여 저항성 검정을 했을 경우, 감수성 품종에 비해 저항성 품종에서 벼멸구의 섭식선호도가 현저하게 저하되어 유충의 발육에 지장이 있었다고 보고하였다. 그러나 본 연구에서는,

Table 2. Developmental period for the nymph stages of Imidacloprid resistant and susceptible *N. lugens* strains fed on different rice varieties, Chinnong and Chuchung

<i>N. lugens</i> strain	Rice variety ^{a)}	N.	Developmental periods (days ± SE) ^{b)}					Survival rate (%)	
			1st	2nd	3rd	4th	5th		Total
Resistant	Chinnong	60	1.9 ± 0.26a	2.5 ± 0.6a	2.3 ± 0.5a	3.0 ± 0.6c	3.9 ± 0.8b	13.2 ± 1.2a	71.7
	Chuchung	60	2.2 ± 0.5b	2.4 ± 0.6a	2.6 ± 0.5b	2.7 ± 0.7bc	4.0 ± 0.6b	13.9 ± 1.4ab	85.0
Susceptible	Chinnong	60	2.9 ± 0.5c	2.5 ± 0.7a	2.5 ± 0.5ab	2.5 ± 0.5ab	3.8 ± 0.7ab	14.2 ± 0.9b	80.0
	Chuchung	82	3.1 ± 0.7c	2.5 ± 0.6a	2.5 ± 0.6ab	2.5 ± 0.6a	3.6 ± 0.5a	14.0 ± 0.8ab	86.6

^{a)} Chinnong is BPH-resistant and Chuchung is BPH-susceptible variety

^{b)} Values followed by the same letter within a column are not significantly different ($P > 0.05$, DMRT).

Table 3. Adult female longevity, fecundity, first reproduction day and reproduction period (Mean ± SE) of Imidacloprid resistant and susceptible *N. lugens* strains

<i>N. lugens</i> strain	Rice variety ^{a)}	N	Longevity (days)	Fecundity	First reproduction (days)	Reproduction period (days)	No. eggs / female/day
Resistant	Chinnong	19	16.4 ± 6.38a	124.0 ± 78.91a	3.5 ± 1.50a	9.0 ± 2.65a	7.0 ± 3.74a
	Chuchung	21	15.9 ± 4.78a	146.9 ± 63.69ab	3.5 ± 0.87a	8.7 ± 1.23a	9.2 ± 3.49ab
Susceptible	Chinnong	17	19.3 ± 8.53a	191.9 ± 118.05b	3.3 ± 0.47a	8.2 ± 0.39a	9.4 ± 3.75ab
	Chuchung	21	19.8 ± 5.51a	200.1 ± 102.02b	3.4 ± 0.93a	8.2 ± 0.68a	9.6 ± 3.49b

^{a)} Chinnong is BPH-resistant and Chuchung is BPH-susceptible variety

^{b)} Values followed by the same letter within a column are not significantly different ($P > 0.05$, DMRT).

Table 4. Life table parameters of *N. lugens* strains

<i>N. lugens</i> strain	Rice variety ^{a)}	Parameters ^{b)}				
		R_0	r_m	λ	T_c	D_t
Resistant	Chinnong	35.9 ± 11.05a	0.13 ± 0.010a	1.1419a	26.99b	5.22b
	Chuchung	68.2 ± 13.44b	0.17 ± 0.007b	1.1811b	25.37a	4.17a
Susceptible	Chinnong	69.7 ± 23.29b	0.15 ± 0.009c	1.1641b	27.94b	4.56b
	Chuchung	69.9 ± 16.23b	0.16 ± 0.007bc	1.1734bc	26.56b	4.33b

^{a)} Chinnong is resistant and Chuchung is susceptible variety

^{b)} R_0 : net reproductive rate (female/female); r_m : intrinsic rate of increase (female/female/day); λ : finite rate of increase (female/female/day); T_c : mean generation time (day); D_t : doubling time (day). Values followed by the same letter within a column are not significantly different ($P > 0.05$, DMRT)

감수성인 추청벼와 저항성인 친농벼에서 차이를 확인할 수 없었으며, 이는 Choi et al. (2015)이 벼멸구의 품종간의 가해특성을 조사를 통해 얻은 저항성 벼 품종과 약충기간과의 차이에 연관성은 낮았다는 보고와 일치하였다. 또한 약충의 생존율은 친농벼에 접종한 저항성 벼멸구 계통에서 가장 낮았고(71.7%), 추청벼에서 키운 감수성 벼멸구 계통이 가장 높았다(86.6%). 이상의 결과로 벼멸구 약충의 발육과 증식에 약제 저항성 형질이 부정적으로 관여하는 것을 확인할 수 있었으며, 그 원인을 구명하는 추가 연구가 필요하리라 생각한다.

상기 약충 발육 실험에서 성충으로 우화한 암컷 개체들의 수명, 산자수, 산란 전 기간 그리고 산란 기간을 조사하였다 (Table 3). 수명은 저항성 벼멸구 계통이 15.6-16.4일로 감수성 계통의 19.3-19.8일보다 짧았으나 통계적으로 유의하지

는 않았다. 산자수는 저항성 벼멸구 계통이 124.0-146.9마리로 감수성 계통의 191.9-200.1마리로 훨씬 적었다. 또한 산란전기와 산란기간에서는 시험구 간에 차이를 볼 수 없었다.

Jackknife방법에 따라 Table 4의 생명표를 작성하였다. 친농벼에서 키운 저항성 벼멸구 계통이 추청벼 시험구 또는 감수성 벼멸구 처리와 비교하여 순증가율은 35.9, 내적자연증가율은 0.13, 기간증가율은 1.1419로 가장 낮았고, 배수기간(D_t)은 5.22일로 가장 길었으며, 그 외 처리구들에서는 parameter들간에 유의적 차이를 보이지 않았다. Liu and Han(2006)은 이미다클로프리트 저항성 벼멸구(205배 저항성)의 적응비용(fitness cost) 추정 연구를 통해 저항성 계통이 감수성에 비해 약충생존율, 우화율, 산자수, 부화율이 낮았다고 보고 하였으며, Jo et al. (2009)은 etofenprox 저항성 복숭아혹진딧물(*Myzus persicae* Sulzer)의 생육특성 조사를

통하여 저항성 계통이 순증가율은, 내적자연증가율과 평균 세대기간은 감수성계통보다 다소 낮았지만 통계적으로 유의하지 않았다고 보고하였다. 결과적으로 이미다클로프리트 저항성 벼멸구 계통은 감수성 계통에 비하여 발육 및 생식 능력이 다소 낮고, 특히 벼멸구 저항성 품종에서 그 정도가 커짐을 알 수 있었다.

저항성 벼 품종에서 벼멸구는 산란 및 섭식선호성, 수명, 발육기간, 생존율, 산란율 등이 떨어지는 것으로 알려져 있다(Kim and Youn, 1987, Park and Song, 1988; Hwang et al., 2002). 그러나 본 시험에서는 친농벼(저항성)와 추청벼(감수성)들 간에 parameter 값들에 유의한 차이를 볼 수 없었다. Choi et al. (2015)는 감수성 벼 품종인 일품벼에서 저항성 벼 품종들 보다 산란수가 많았고, 우화율이 높았으며, 성충 생존율도 높았으나, 일부 저항성 벼에서는 감수성 계통과 비슷하거나 높은 값들을 보여 보충시험의 필요성을 제안한 바 있다. 본 실험에서는 벼 성묘가 아닌 유묘를 사용하였고, 벼멸구의 생태적 특성은 먹이조건 등 생육환경에 크게 영향을 받을 수 있기 때문에 친농벼가 저항성이 약하다고 단정하기는 어렵다. 한편, 벼멸구가 누대사육 했을 때 3-6세대 만에 그 품종 적응성이 변할 수 있고(Hwang et al., 2002), 야생 벼멸구의 저항성 적응 능력이 증가하는 경향이 중국 남부와 일본에서도 보고되고 있어(Tanaka와 Matsumura, 2000), 본 시험에 사용된 비래 벼멸구 계통이 친농벼에 적응했을 가능성도 배제하기 어렵다.

약제저항성 벼멸구와 저항성 품종과의 관계

본 연구는 이미다클로프리트 저항성 벼멸구를 벼멸구 저항성 품종인 친농에 접종하여 그 생태적 특성 조사를 통하여 약제저항성과 품종저항성의 상관관계를 살펴 보고자 하였다. 결론적으로 이미다클로프리트 감수성 계통에서는 품종의 영향은 확인하지 못했으나 저항성 벼멸구 계통에서는 저항성 벼 품종인 친농벼에서 생존능력이 통계적으로 유의하게 낮았음을 확인할 수 있었다. 우리나라에 피해를 주는 벼멸구는 매년 중국으로부터 이미다클로프리트 및 티아메톡삼 등 약제에 대하여 저항성을 획득하여 비래하므로, 벼 저항성 품종의 재배면적을 늘리는 것으로 방제 비용의 감소 및 방제 효율을 높일 것으로 판단된다. 비래 벼멸구의 살충제 저항성 개체군 관리와 친환경농업의 보급에 따른 벼 저항성 품종의 재배면적 증가를 고려할 때, 중국의 벼멸구 약제 저항성 수준과 저항성 품종에 대한 가해 능력의 선행 정보 확보가 매우 중요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 1개의 저항성 계통과 1개의 저항성 품종을 비교한 것으로, 약제 저항성과 해충과 해충저항성 품종간의 구체적인 관계 파악에 한계가 있었다. 앞으로 보다 다양한 약제 저항성 벼멸구 계통과 대상 벼 품종을 확보하여 심도 깊은 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ010917 2017)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

Literature Cited

- Bonman J. M., G. S. Khush and R. J. Nelson (1992) Breeding rice for resistance to pests. Annu. Rev. in Phytopathol. 30:507-528.
- Cheng, S. N., J. C. Chen, H. Si, L. M. Yan, T. L. Chu, C. T. Wu, J. K. Chien and C. S. Yan (1979) Studies on the migration of brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål). Acta Entoml. Sin. 22:1-21.
- Choi, K. M. (1998) Occurrence ecology of rice planthoppers In Review of the occurrence and management of *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera* in Korea.. RDA; Suwon city. pp.24-56.
- Choi, N. J., J.-Y. Choi, D. B. Shin and S. L. Kim (2015) Injury characteristics to migrated Korean populations of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål, on resistant rice varieties. J. Agric & Life Sci. 46:40-44.
- Cabauatan, P. Q., R. C. Cabunagan and I. R. Choi (2009) Rice viruses transmitted by the brown planthopper *Nilaparvata lugens* Stål. In: Heong, K.L., Hardy, B. (Eds.), Planthoppers: new threats to the sustainability of intensive rice production systems in Asia. International Rice Research Institute, Los Baños (Philippines), pp. 357-368.
- Elbert, A., M. Hass, B. Springer, E. Thielert and R. Nanen (2008) Applied aspects of neonicotinoid uses in crop protection. Pest Manag. Sci. 64:1099-1105.
- Endo, S. and M. Tsurumachi (2001) Insecticide susceptibility of the brown planthopper and the white-backed planthopper collected from South east Asia. J. Pestic. Sci. 26:82-86.
- Fujita, D., A. Kohli and F. Horgan (2013) Rice resistance to planthoppers and leafhoppers. Critical Reviews in Plant Science. 32:162-191.
- Hwang, I.-C, J.-H Kim and Y.-H Song (2002) Changes in the fitness of brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål. (Homoptera: Delphacidae) to several resistant rice varieties after multi-generational selection. Korean J. Appl. Entomol. 41:113-121.
- Jo, C. W., C. R. Park, K. S. Yoon, M. A. Kang, H. R. Kwon, E. J. Kang, M. J. Seo, Y. M. Yu and Y. N. Yoon (2009) Comparison of life table and feeding behavior of resistance and susceptible population of the green aphid, *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae) against Etofenprox. Korean J. Appl. Entomol. 48:301-310.
- Kim, J. W. and S. W. Youn (1987) Varietal resistance of rice to the BPH, *Nilaparvata lugens* Stål, biotype 1, 2, 3 and their hybrid progenies. Korean. J. Plant Prot. 26:63-69.
- Kisimoto, R. (1976) Synoptic weather conditions inducing

- long-distance immigration of planthoppers, *Sogatella furcifera* Horvath and *Nilaparvata lugens* Stål. Ecol. Entomol. 1:95-109.
- Li, Q., S. Y. Luo and S. M. Wei (1999) Mensuration of the brown planthopper biotypes and the relationship of the migration. Entomol. Knowl. 36:257-260.
- Liu, Z. and Z. Han (2006) Fitness cost of laboratory-selected imidacloprid resistance in the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål. Pest Manag. Sci. 62:279-282.
- Matsumura, M., H. Takeuchi, M. Satoh, S. Sanada-Morimura, A. Otuka, T. Watanabe and D. Van Thanh (2008) Species-specific insecticide resistance to imidacloprid and fipronil in the rice planthoppers *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera* in East and South-east Asia. Pest Manag. Sci. 64:1115-1121.
- Matsumura, M., H. Takeuchi, M. Satoh, S. Sanada-Morimura, A. Otuka, T. Watanabe and D. Van Thanh (2009) Current status of insecticide resistance in rice planthoppers in Asia. In: Heong, K. L., Hardy, B. (Ed.), Planthoppers: New Threats to the Sustainability of Intensive Rice Production Systems in Asia. Int. Rice Res. Inst., Los Baños, Philippines, pp.233-243.
- Meng, X., C. Zhu, Y. Feng, W. Li, X. Shao, Z. Xu, J. Cheng and Z. Li (2016) Computational insight into the different resistance mechanism of imidacloprid versus dinotefuran in *Bemisia tabacii*. J. Agric. Food Chem. 64:1231-1238.
- Meyer, J. S., C. G. Igersoll, L. L. MacDonald and M. S. Boyce (1986) Estimating uncertainty in population growth rates: Jackknife vs bootstrap techniques. Ecology 67:1156-1166.
- Min, S., S. W. Lee, B. R. Choi, S. H. Lee and D. H. Kwon (2014) Insecticide resistance monitoring and correlation analysis to select appropriate insecticides against *Nilaparvata lugens* (Stål), a migratory pest in Korea. J. Asia-Pac. Entomol. 17:711-716.
- Nagata, T. and S. Moriya (1974) Resistance in the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål, to lindane. Appl. Entomol. Zool. 18:73-80.
- Park, Y. D. and Y. H. Song (1988). Preference, development and fecundity of the brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål) biotypes fed on different cultivars of rice with various resistance gene. Korean J. Appl. Entomol. 27:87-93.
- Prabhaker, N., S. Castle, T. J. Henneberry and N. C. Toscano (2005) Assessment of cross-resistance potential to neonicotinoid insecticides in *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) Bull. Entomol. Res. 95:535-543.
- RDA (2010) 2010 Project report for collaborative research program to develop new variety summer crop. pp.5-175.
- Saxena, R. C. and A. A. Barrion (1985) Biotypes of the brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål) and strategies in deployment of host plant resistance. Insect Sci. Applic. 6:271-289.
- Shi, X., L. Jiang, H. Wang, K. Qiao, D. Wang and K. Wang (2011) Toxicities and sublethal effects of seven neonicotinoid insecticides on survival, growth and reproduction of imidacloprid-resistant cotton aphid, *Aphis gossypii*. Pest Manag. Sci. 67:1528-1533.
- Shin, M.-S, J.-K. Ko, J.-C. Ko, B.-K. Kim, H.-J. Kang, Y.-D. Kim, J.-K. Nam, K.-Y. Ha, M.-G. Baek, W.-C. Shin, W.-J. Kim, H.-S. Park, S.-H. Baek, Y.-J. Mo, I.-B. Choi, G.-H. Lee, Y.-B. Lee and J.-G. Kim (2012) A brown planthopper resistane and high quality rice variety 'Chinnong'. Kor. J. Breed. Sci. 44:373-378.
- Tanaka K. and M. Matsumura (2000) Development of virulence the resistant rice varieties in the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae), immigrating into Japan. Appl. Entomol. Zool. 35:529-533.
- Uchida, M., T. Asai and T. Sugimoto (1985) Inhibition of cuticle deposition and chitin biosynthesis by a new insect growth regulator, buprofezin, in *Nilaparvata lugens* Stål. Agric. Biol. Chem. 49:1233-1234.
- Wang, Y., J. Chen, Y. C. Zhu, C. Ma. Y. Huang and J. Shen (2008) Susceptibility to neonicotinoids and risk of resistance development in the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål (Homoptera: Delphacidae). Pest Manag. Sci. 64:1278-1284.
- Wang, Y. H., C. F. Gao, Y. C. Zhu, J. Chen, W. H. Li, Y. L. Zhuang, D. J. Dai, W. J. Zhou, C. Y. Ma and J. L. Shen (2008) Imidacloprid susceptibility survey and selection risk assessment in field populations of *Nilaparvata lugens* (Homoptera : Delphacidae). J. Econ. Entomol. 101:515-522.
- Zhang X. L, X. Y. Liu, F. X. Zhu, J. H. Li, H. You and P. Lu (2014) Field evolution of insecticide resistance in the brown planthopper (*Nilaparvata lugens* stål) in China, Crop. Prot. 58:61-66.
- Zhang X, X. Liao, K. Mao, K. Zhang, H. Wan and J. Li (2015) Insecticide resistance monitoring and correlation analysis of insecticides in field populations of the brown planthopper *Nilaparvata lugens* (stål) in China 2012-2014, Pestic. Biochem. Physiol. 132:13-20.

이미다클로프리드 저항성 벼멸구의 살충제 교차저항성과 두 종류 벼 품종(친농과 추청)에서의 발육특성

정인홍* · 전성욱 · 이상구 · 박부용 · 박세근 · 이상범 · 최낙중¹ · 이시우² · 이시혁³ · 권덕호³

국립농업과학원 농산물안전성부 작물보호과, ¹국립식량과학원 작물기초기반과
²국립식량과학원 중부작물부 재배환경과, ³서울대학교 농업생명과학연구원

요 약 이미다클로프리드 저항성 벼멸구 계통의 벼멸구 저항성 벼 품종에 대한 생육특성 차이를 조사하였다. 벼멸구 계통은 이미다클로프리드 추천농도(20 ppm)에서 2.7%의 사충률을 보였으며, 감수성 계통에 대한 반수치사농도 기준 저항성비는 17.76이었다. 이미다클로프리드 저항성 벼멸구 계통의 9종 살충제에 대한 살충활성을 비교한 결과 4종의 네오니코티노이드계 살충제(acetamiprid, clothianidin, thiamethoxam, thiacloprid)에서 교차저항성이 있었으나, 카바메이트계(fenobucarb), 피레스로이드계(etofenprox), 설폰사민계(sulfoxaflor)에서는 교차저항성이 없었다. 이미다클로프리드 저항성 벼멸구 계통의 벼멸구 저항성 벼 품종인 친농벼와 감수성 벼 품종인 추청벼에서의 생육의 차이를 조사한 결과 이미다클로프리드 감수성 계통은 2종 벼 품종에 발육특성의 차이가 없었으나, 저항성 계통은 친농벼에서 약충기간 변화, 산자수 감소, 순증가율(R_0) 감소, 내적자연증강율(r_m) 감소 그리고 배수기간(D_0) 증가 등의 현상이 통계적으로 유의하게 나타났다. 이러한 결과는 이미다클로프리드 저항성 벼멸구는 생육이 저항성 벼 품종에 영향을 받음을 의미한다.

색인어 벼멸구, 살충제저항성, 이미다클로프리드, 벼멸구 저항성 벼 품종, 친농