

광릉긴나무좀, 왕녹나무좀, 노랑애나무좀 성충에 대한 포스핀의 훈증활성

조성우 · 김성일 · 김현경 · 김길하*

충북대학교 식물의학과

Fumigant Activity of Phosphine Against Three Wood Boring Beetles, *Platypus koryoensis*, *Cryphalus fulvus*, and *Xyleborus mutilatus*

Sung Woo Cho, Sung Il Kim, Hyun Kyung Kim and Gil-Hah Kim*

Department of Plant Medicine, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

ABSTRACT: Many forest pests have caused problems for wood quarantine. The fumigation activity of phosphine (PH₃) was examined for the adults of three wood-boring insect pests. The LCT₉₉ values for *Platypus koryoensis*, *Cryphalus fulvus*, and *Xyleborus mutilatus* were 3.192, 0.994, and 0.501 mg · h/L at 20°C, respectively. The effectiveness of PH₃ was increasingly time dependent for all doses tested in all three species. In particular, *P. koryoensis* showed 100% mortality at doses higher than 0.4 mg/L 7 days after fumigation. These results indicate that methyl bromide could be substituted for PH₃ for adults of these three species of wood pest.

Key words: Phosphine, Scolytidae, Platypodidae, Fumigation, Wood quarantine

초 록: 많은 산림해충들은 목재검역에서 문제가 되고 있어 포스핀(PH₃)을 이용하여 광릉긴나무좀, 왕녹나무좀, 노랑애나무좀의 성충에 대한 살충 활성을 조사하였다. 3종의 나무좀류에 대하여 99% 살충활성을 보이는 LCT값은 각각 3.192 (광릉긴나무좀), 0.994 (왕녹나무좀), 0.501 mg · h/L (노랑애나무좀) 순으로 나타났다. 포스핀을 처리한 3종의 나무좀류는 시간이 지남에 따라 살충활성도 증가하였다. 특히 광릉긴나무좀에서는 0.4 mg/L 이상의 농도에서 약제처리 7일 후에 100%의 사충률을 보였다. 이러한 결과로 볼 때 포스핀이 3종의 목재해충 성충에 대해 메틸브로마이드의 대체훈증제로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

검색어: 포스핀, 긴나무좀과, 왕나무좀과, 훈증제, 목재검역

훈증제는 검역해충을 방제하는데 있어 널리 사용되고 있는 화학적 방제방법 중 하나로 특히, 목재에 쉽게 침투하는 특성으로 목재해충 방제에 이용되고 있다(Su and Scheffrahn, 1986; Choi et al., 2014). 현재 국내에서 수출입식물에 대한 검역용 훈증제로 사용되고있는 약제는 약 100여 종에 이르나 식물검역용으로는 methyl bromide (MB)가 가장 많이 사용되고 있다(Moon, 2012). MB는 짧은 처리시간에 해충을 사멸시킬 수 있으면서 잔류 문제가 거의 없어 전세계적으로 목재에 대한 소독 처리 약제로 활용되고 있다(Barak et al., 2005; Moon, 2012). 그러나 MB는 1992년 몬트리올의정서에서 오존층 파괴물질로

지정되어 국제적으로 사용이 제한되고 있고, 다른 훈증제에 비해 목재에 깊게 침투하는 능력이 떨어져 목재 내부에 존재하는 해충을 방제하기 어렵다는 문제점을 가지고 있어 이를 대체할 수 있는 물질의 개발이 필요한 실정이다(UNEP, 2006; Ren et al., 2011).

포스핀(PH₃)은 목재 검역용 훈증제인 MB를 대체할 수 있는 훈증제 중 하나로 곤충에 높은 독성을 보인다(Chaudhry, 1997; Fields and White, 2002; Brash and Page, 2009). PH₃은 하늘소과(*Semanotus japonica*, *Callidiellium rufipenne*, *Monochamus alternatus*), 나무좀과(*Phloeosinus perlatus*, *Cryphalus fulvus*, *Xyleborus pfeili*), 긴나무좀과(*Platypus quercivorus*, *P. calamus*)와 흰개미에 대해 살충효과가 있으며, 증기압이 높아 목재에 침투, 확산이 MB보다 우수하다는 보고가 있다(Oogita et al., 1997;

*Corresponding author: khkim@chungbuk.ac.kr

Received November 23 2018; Revised January 28 2019

Accepted February 2 2019

Ren et al., 2011; Choi et al., 2014).

광릉긴나무좀(*Platypus koryoensis*: Platypodinae)은 국내에서 가장 중요한 참나무 해충으로 *Raffaelea quercus-mongolicae* 균을 매개하여 참나무시들음병을 유발한다(Suh et al., 2011). 노랑애나무좀(*Cryphalus fulvus*: Scolytidae)과 왕녹나무좀(*Xyleborus mutilatus*: Scolytidae)은 천공성 해충으로 소나무류에 기생하는 나무좀류 중 가장 널리 분포하고 있는 종으로 주로 고사한 나무를 가해하나 건전한 나무를 가해하기도 한다(Choi et al., 2017). 이들 3종의 나무좀(ambrosia beetle)은 공생 미생물(곰팡이와 세균)을 영양분으로 이용하는 곤충으로 목재에 터널을 뚫고 미생물을 증식시켜 나무에 피해를 가하게 된다(Kasson et al., 2016; Hulcr and Stelinski, 2017).

본 연구는 목재 수출입시 문제가 될 수 있는 목재해충 3종(광릉긴나무좀, 노랑애나무좀, 왕녹나무좀)에 대한 PH₃의 훈증효과를 탐색하고 MB 대체물질로서의 활용가능성을 확인하고자 하였다.

재료 및 방법

실험곤충

실험에 사용한 곤충은 광릉긴나무좀(*Platypus koryoensis*)과 노랑애나무좀(*Cryphalus fulvus*), 왕녹나무좀(*Xyleborus mutilatus*) 성충으로 고사목과 피해가 심한 감염목을 충북산림환경연구소에서 분양 받아 확보하였다.

훈증제

실험에 사용된 훈증제는 포스핀(2% PH₃ + 98% CO₂)으로 Cytec (Sydney, Australia)에서 구입하였다.

훈증활성 시험

광릉긴나무좀과 노랑애나무좀, 왕녹나무좀 성충이 감염된

고사목(7 cm i.d. × 15 cm length) 4개를 12 L desiccator에 넣고 grease (Dow Corning® high vacuum grease, Dow Corning, USA)로 완전히 밀폐한 후, gastight syringe (100 ml, Hamilton, Nevada, USA)를 이용하여 PH₃를 주입하였다. Desiccator내의 마그네틱바를 이용하여 5분동안 가스를 순환시켰다. 3종의 나무좀류는 24시간동안 약제처리 후, 후드에서 2시간동안 배기시킨 다음 상온에서 보관하고 7일 후 손도끼를 이용하여 고사목과 감염목을 쪼개어 나온 성충을 건드려보아 움직임이 없는 사충수를 조사하여 살충율을 계산하였다.

시간별 훈증활성을 평가하기 위하여 24시간 약제처리 후 1일부터 7일까지의 활성을 비교하였다. 3종의 나무좀에 대한 살충활성은 각각 5~6농도로 처리하여 비교하였다. 각 농도별 PH₃는 20°C에서 24시간동안 훈증처리하였다. 모든 실험은 3반복으로 수행하였다.

데이터 분석

3종의 나무좀류에 대한 PH₃의 치사농도시간(LCT₅₀과 LCT₉₉, lethal concentration and time)은 실측 사충률을 사용하여 probit analysis 방법으로 구하였다(SAS Institute, 2009). 상대독성(relative toxicity, RT)값은 광릉긴나무좀의 LCT값을 기준으로 약제 감수성을 비교하였다.

결과

광릉긴나무좀과 노랑애나무좀, 왕녹나무좀 성충에 대한 PH₃의 훈증독성을 확인하였다(Table 1).

3종의 나무좀 중 PH₃에 대해 광릉긴나무좀의 LCT₅₀값이 0.415 mg · h/L로 가장 높은 내성을 보였으며 왕녹나무좀이 0.209 mg · h/L로 광릉긴나무에 비해 1.98배 높은 약제 감수성을 보였으나 LCT₉₉값에 대한 RT값은 6.37배 높은 감수성을 보였다.

약제 농도와 훈증처리 후 기간에 따른 3종의 나무좀에 대한 살충활성을 조사하였다(Fig. 1).

Table 1. Toxicity of PH₃ against *Cryphalus fulvus*, *Xyleborus mutilates* and *Platypus koryoensis* fumigated in desiccators at 20°C for 24 h

Insect	n	Slope (±SE)	x ²	LCT ₅₀ (mg · h/L) (95% CI) ^a	RT ₅₀ ^b	LCT ₉₉ (mg · h /L) (95% CI)	RT ₉₉
<i>C. fulvus</i>	180	5.41 (±0.56)	93.14	0.369 (0.336-0.402)	1.13	0.994 (0.840-1.269)	3.21
<i>X. mutilatus</i>	135	11.69 (±1.86)	39.83	0.209 (0.199-0.217)	1.98	0.501 (0.353-1.518)	6.37
<i>P. koryoensis</i>	180	2.62 (±0.88)	8.99	0.415 (0.024-0.770)	1	3.192 (2.423-9.359)	1

^aCI denotes the confidence limit.

^bRT denotes the relative toxicity, i.e., the LCT value of adult *P. koryoensis* / LCT values of other wood-boring pests.

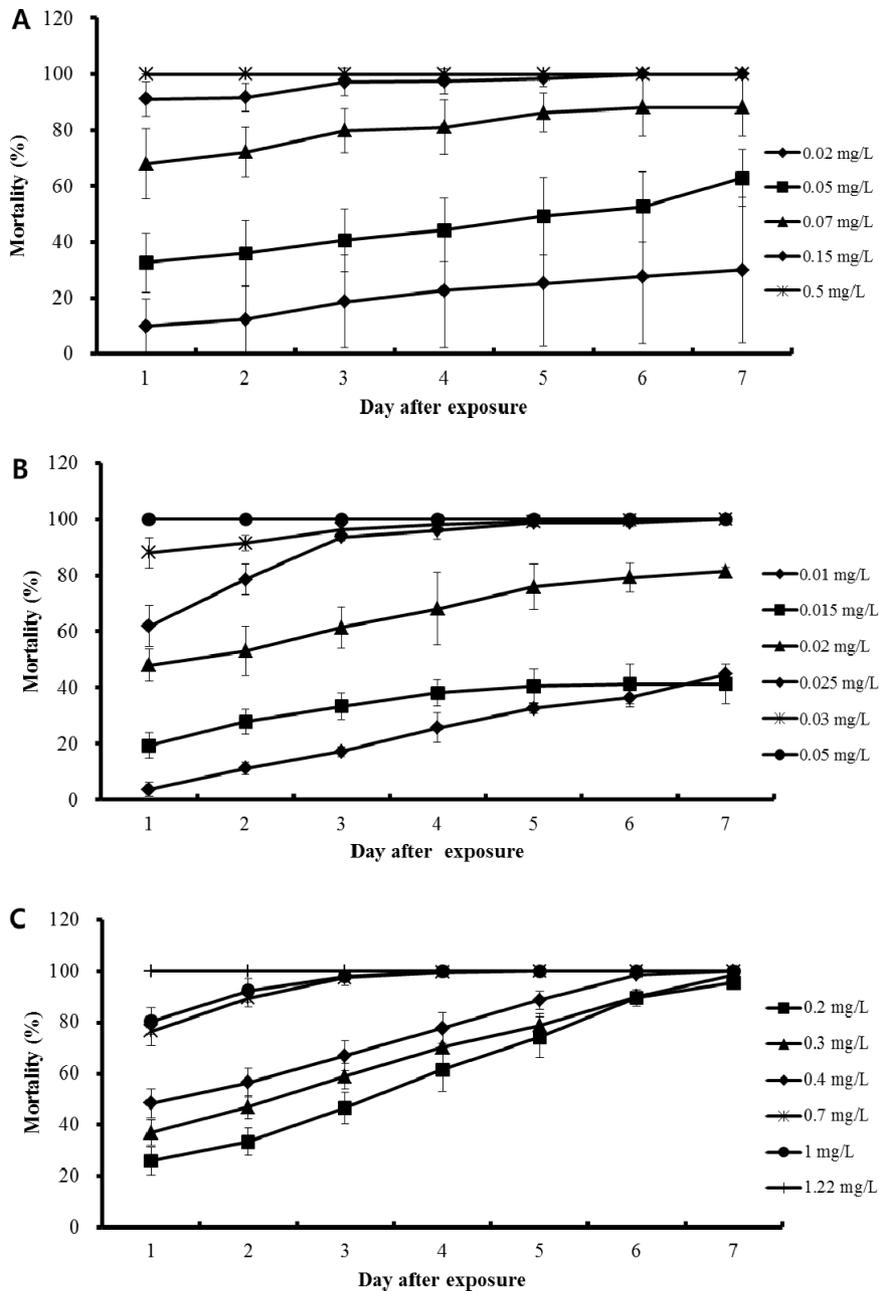


Fig. 1. Mortality of 3 wood-boring pests exposed to different concentrations of PH₃. A, *C. fulvus*; B, *X. mutilatus*; C, *P. koryoensis* (n = 45, each concentration respectively).

노랑애나무좀은 농도가 증가할수록 살충활성이 증가하였으며 0.5 mg/L으로 24시간 PH₃ 처리 후 1일 차부터 100%의 살충 활성을 나타냈다. 또한 약제처리 6일 후에는 0.15 mg/L 처리에서도 100%의 활성을 보였다. 그러나 0.07 mg/L 이하의 농도에서는 시간이 지남에 따라 살충활성이 증가하였으나 100% 살충 활성을 보이지는 않았다.

왕록나무좀은 0.05 mg/L 처리시 PH₃ 처리 1일 후부터 100%의 살충활성을 보였으며 0.025 mg/L 이상에서는 5일 후부터

100%의 살충활성을 보였다. 왕록나무좀 역시 시간이 지남에 따라 활성이 증가하였으나 0.02 mg/L 이하에서는 100% 방제가 되지 않았다.

광릉긴나무좀에서는 1.22 mg/L 처리시 1일 후 100%의 훈증 활성을 보였으며 0.4 mg/L 이상의 농도에서는 7일 후부터 100% 살충활성을 나타냈다. 또한, 0.3 mg/L 이하 처리시에서도 7일 후부터는 90% 이상의 높은 살충활성을 나타내었다.

고찰

PH₃은 저장해충을 방제하는데 메틸브로마이드(MB)의 대체 훈증제 중 하나로 널리 이용되고 있다(Fields and White, 2002). 그러나 PH₃은 가연성이 높은 위험물질로 알려져 있고 긴 처리시간을 요구한다는 단점이 있어 이를 보완하여 보다 안전하고 편리하게 사용할 수 있도록 인화알루미늄(aluminum phosphide)과 인화마그네슘(magnesium phosphide) 등 금속과 결합시켜 대기의 수분과 반응하여 천천히 기화될 수 있게 알약형태로 사용되고 있다(Ducom, 2006; Follett and Neven, 2006). 본 연구에서는 처리시간을 단축하기 위하여 3종의 나무종류에 대하여 가스상태의 PH₃을 사용하여 24시간 노출시의 훈증활성을 탐색하였다. 그 결과, 3종의 나무종류 성층에 대해 모두 PH₃의 훈증활성을 확인할 수 있었다. 그러나 PH₃에 대한 감수성 비교에서는 광릉긴나무종의 내성이 가장 높게 나타났는데 광릉긴나무종과 왕녹나무종은 유사한 총체크기(4 mm 내외)를 갖는데 PH₃에 대한 훈증활성은 반수치사량에서 6배의 차이를 보였고 가장 크기가 작은 노랑애나무종(1.5 mm 정도)이 왕녹나무종보다 더 높은 내성을 보여 층의 크기와는 큰 관련이 없어 보였다. 이것은 PH₃이 발육단계나 곤충 종에 따라 활성의 차이를 보이기 때문으로, 일반적으로 알과 번데기가 유충과 성충보다 내성이 강하게 나타나는데 북승아심식나방(*Carposina niponensis*)과 붉은팜야자바구미(*Rhynchophorus ferrugineus*), 감자빨나방(*Phthorimaea operculella*), 귤가루각지벌레(*Planococcus citri*), 꽃노랑총채벌레(*Frankliniella occidentalis*) 등의 알에서 매우 높은 내성이 보고되었다(Liu et al., 2010; Llácer and Jacas, 2010; Kim et al., 2015; Yang et al., 2016; Kyung et al., 2018). Sulfuryl fluoride (SF) 처리시에도 노랑애나무종의 알에서 가장 높은 저항성을 보였다(Soma et al., 1996). 또한 붉은팜야자바구미의 성충이 유충보다 더 감수성을 보였다(Llácer and Jacas, 2010). 같은 목재해충인 하늘소류(*Arthropalus fesus*) 성충은 200~2,000 ppm에서 24시간 처리시 100% 살충률을 보였고, 알은 200 ppm에서 5일간 훈증하거나 또는 100 ppm에서 10일간 훈증시 100% 훈증활성을 보였다(Brash and Page, 2009). 따라서 층의 종류와 층의 발육단계에 따른 훈증활성의 활성이 차이가 날 수 있으며 훈증기간에 따라서도 차이가 나타남을 알 수 있다.

또한 PH₃은 긴 처리시간을 필요로 하는 훈증제로 알려져 있어 본 실험에서는 PH₃을 24시간동안 노출시킨 후 시간에 따른 훈증활성을 조사하였다. 3종의 나무종류 모두 PH₃처리 후 시간이 지남에 따라 훈증활성도 증가하는 것을 알 수 있었다. 특히 광릉긴나무종의 경우 PH₃처리 7일 후에야 100% 훈증활성을

보이기도 하였다. 이러한 결과는 훈증제에 노출된 시간뿐 만 아니라 노출 후 약효가 나타나기까지 층의 종류나 층태에 따라 차이가 나타나는데 이는 PH₃의 특성상 약효가 나타나기까지 긴 시간이 필요하기 때문으로 보인다(Kim et al., 2015). 이와 같은 연구결과는 성층에 대한 훈증활성만을 조사하였기에 알과 번데기와 같은 다른 발달단계에 대한 활성탐색이 후속연구로 진행되어야 할 것이며, PH₃의 활성이 나타나기까지 긴시간이 걸리는 단점을 극복하기 위한 다양한 방법들이 연구되어야 할 것이다.

3종의 나무종(광릉긴나무종, 왕녹나무종, 노랑애나무종)은 천공성해충으로 목질부내에 서식하게 되는데 이들을 방제하기 위해서는 약제의 침투성이 높아야 한다. PH₃은 다른 훈증제에 비해 목재 침투성이 좋다고 보고되어 있고 본 실험 역시 목재내부에 존재하는 해충, 3종의 나무종류에 대하여 높은 훈증활성이 나타났다(Ren et al., 2011; Pant et al., 2012; Choi et al., 2014).

그러므로 PH₃은 MB를 대체하여 목재해충인 3종의 나무종(광릉긴나무종, 왕녹나무종, 노랑애나무종)을 방제할 수 있는 훈증제로 활용이 가능하다고 판단된다.

Literature Cited

- Barak, A.V., Wang, Y., Xu, L., Rong, L., Hang, X., Zhan, G., 2005. Methyl bromide as a quarantine treatment for *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) in regulated wood packing material. *J. Econ. Entomol.* 98, 1911-1916.
- Brash, D.W., Page, B.B.C., 2009. Review of phosphine research for control of timber quarantine pests. Plant and Food Research Confidential Report No. 2370. 28 pp. The New Zealand Institute for Plant & Food Research Limited. Palmerston North, New Zealand.
- Chaudhry, M.Q., 1997. A review of the mechanisms involved in the action of phosphine as an insecticide and phosphine resistance in stored-product insects. *Pestic. Sci.* 49, 213-228.
- Choi, K.S., Kim, H.K., Lee, B.H., Kim, B.S., Yang, J.O., Koo, H.N., Kim, G.H., 2014. Fumigant toxicity of phosphine to the Japanese termite, *Reticulitermes speratus* Kolbe (Isoptera: Rhinotermitidae). *J. Stored. Prod. Res.* 57, 24-29.
- Choi, W.I., Kim, K.M., Koh, S.H., Nam, Y.W., 2017. A study on the community of xylophagous beetles in Korean white pine, *Pinus koraiensis*, forests. *Korean J. Appl. Entomol.* 56, 41-49.
- Ducom, P.J.F., 2006. The return of the fumigants, pp. 510-516, in: Lorini, I., Bacaltchuk, B., Beckel, H., Deckers, D., Sundfeld, E., dos Santos, J.P., Biagi, J.D., Celaro, J.C., Faroni, L.R.D.A., Bortolini, L.de O.F., Sartori, M.R., Elias, M.C., Guedes, R.N.C., da Fonseca, R.G., Scussel, V.M. (Eds.), Proceedings of the Ninth International Working Conference on Stored Product Protection,

- 15-18 October 2006, Campinas, Brazil, Brazilian Post-harvest Association, Campinas, Brazil.
- Fields, P.G., White, N.D., 2002. Alternatives to methyl bromide treatments for stored product and quarantine insects 1. *Annu. Rev. Entomol.* 47, 331-359.
- Follett, P.A., Neven, L.G., 2006. Current trends in quarantine entomology. *Annu. Rev. Entomol.* 51, 359-385.
- Hulcr, J., Stelinski, L.L., 2017. The ambrosia symbiosis: From evolutionary ecology to practical management. *Annu. Rev. Entomol.* 62, 285-303.
- Kasson, M.T., Wickert, K.L., Stauder, C.M., Macias, A.M., Berger, M.C., Simmons, D.R., Short, D.P., DeVallance, D.B., Hulcr, J., 2016. Mutualism with aggressive wood-degrading *Flavodon ambrosius* (Polyporales) facilitates niche expansion and communal social structure in *Ambrosiophilus* ambrosia beetles. *Fungal Ecol.* 23, 86-96.
- Kim, H.K., Lee, S.W., Kim, J.I., Yang, J.O., Koo, H.N., Kim, G.H., 2015. Synergistic effects of oxygen on phosphine and ethyl formate for the control of *Phthorimaea operculella* (Lepidoptera: Gelechiidae). *J. Econ. Entomol.* 108, 2572-2580.
- Kyung, Y., Kim, H.K., Lee, J.S., Kim, B.S., Yang, J.O., Lee, B.H., Koo, H.N., Kim, G.H., 2018. Efficacy and phytotoxicity of phosphine as fumigants for *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) on asparagus. *J. Econ. Entomol.* 111, 2644-2651.
- Liu, B., Zhang, F., Wang, Y., 2010. Toxicity of phosphine to *Carposina niponensis* (Lepidoptera: Carposinidae) at low temperature. *J. Econ. Entomol.* 103, 1988-1993.
- Llácer, E., Jacas, J.A., 2010. Efficacy of phosphine as a fumigant against *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Curculionidae) in palms. *Span. J. Agric. Res.* 8, 775-779.
- Moon, Y.M., 2012. Development of optimal methods of phosphine fumigation to control insect pests on cut flowers and nursery stocks. Ph.D. Thesis, Korea University, Seoul, Korea.
- Oogita, T., Soma, Y., Mizobuchi, M., Oda, Y., Matsuoka, I., Kawakami, F., 1997. Mortality tests for forest insect pests by phosphine fumigation. *Res. Bull. Plant Protec. Ser. (Japan)* 38, 17-20.
- Pant, H., Tripathi, S., 2012. Evaluation of aluminum phosphide against wood-destroying insects. *J. Econ. Entomol.* 105, 135-139.
- Ren, Y., Lee, B., Padovan, B., 2011. Penetration of methyl bromide, sulfuryl fluoride, ethanedinitrile and phosphine into timber blocks and the sorption rate of the fumigants. *J. Stored Prod. Res.* 47, 63-68.
- Soma, Y., Yabuta, S., Mizoguti, M., Kishino, H., Matsuoka, I., Goto, M., Akagawa, T., Ikeda, T., Kawakami, F., 1996. Susceptibility of forest insect pests to sulfuryl fluoride. 1. Wood borers and bark beetles. *Res. Bull. Plant Protec. Ser.* 32, 69-76.
- Su, N.Y., Scheffrahn, R.H., 1986. Field comparison of sulphuryl fluoride susceptibility among three termite species (Isoptera: Kalotermitidae, Rhinotermitidae) during structural fumigation. *J. Econ. Entomol.* 79, 903-908.
- Suh, D.Y., Hyun, M.W., Kim, S.H., Seo, S.T., Kim, K.H., 2011. Filamentous fungi isolated from *Platypus koryoensis*, the insect vector of oak wilt disease in Korea. *Mycobiology* 39, 313-316.
- UNEP, 2006. Handbook for the Montreal protocol on substances that deplete the Ozone layer, pp. xi+482, Nairobi.
- Yang, J.O., Park, Y., Kim, I.H., Kim, G.H., Kim, B.S., Lee, B.H., Ren, Y.L., 2016. A combination treatment using ethyl formate and phosphine to control *Planococcus citri* (Hemiptera: Pseudococcidae) on pineapples. *J. Econ. Entomol.* 109, 2355-2363.