

국내외 흰개미 방제 기술의 발달 과정과 목조건축문화재의 흰개미 피해 저감을 위한 방안

이상빈 플로리다대학교 곤충 및 선충학과 박사 후 연구원

임익균 충북대학교대학원 문화재과학협동과정 박사과정

김시현* 국립문화재연구소 안전방재연구실 학예연구사

*Corresponding Author : shkim1242@korea.kr

국문초록

이 논문에서는 흰개미 방제의 발달 과정과 최근 연구 동향, 국내 목조건축문화재의 흰개미 피해 현황과 조사 및 방제 등을 살펴보고 목조건축문화재의 흰개미 피해 예방을 위한 방안을 제시하고자 하였다. 목재는 건축 재료로 다양한 장점이 있어 우리나라에서도 다수의 목조건축문화재가 남아 있다. 목조건축문화재의 다양한 손상 요인 중 흰개미에 의한 피해가 다수 확인되고 있으며, 우리나라에서 확인된 3종의 흰개미 중 *Reticulitermes speratus kyushuensis*가 전국적으로 서식하며 목조건축문화재를 가해한다.

흰개미 방제의 발달 과정을 1900년대 초반부터 살펴보면 이 시기에는 비소 등 무기살충제가 주로 사용되다가 1940년대 유기염소계 살충제가 개발되어 흰개미 방제에도 사용되었다. 이후 이 약제들의 인축과 환경에 대한 독성이 알려짐에 따라 1960년대 유기인계 살충제, 1970년대 카바메이트계 살충제, 1980년대 피레스로이드계 살충제와 곤충생장 조절제, 1990년대 페닐피라졸계 살충제, 네오니코티네이드계 살충제 등이 개발되어 흰개미 방제에 사용되었다.

이와 별도로 흰개미의 생태적 특징을 이용한 흰개미 군체 제거제가 1990년대 개발되어 상용화되었으며, 특히 키틴 합성 저해제가 널리 사용되고 있다. 2000년대 이후에는 살충제를 이용한 토양 처리와 군체 제거제의 특성을 규명하고 효율성을 향상시키거나, 새로운 제형의 약제를 개발하거나, 종합적 유해 생물 관리(IPM) 개념을 차용한 통합적 흰개미 관리(ITM)을 적용하거나, 개별 건물이 아닌 목조건축물군을 보호하는 방향으로 흰개미 방제 연구가 수행되고 있다.

국내 목조건축문화재의 흰개미 피해는 1980년대부터 발견되기 시작하였으며 1990년대 후반 유네스코 세계유산인 종묘 정전, 해인사 장경판전 주변에서 흰개미 피해가 확인되어 관심을 받게 되었다. 이후 지정문화재를 중심으로 흰개미 피해 현황이 조사되었으며 2010년대에는 국립문화재연구소와 문화재돌봄사업단이 지정문화재를 중심으로 정기적인 흰개미 피해 조사를 수행하고 있다.

목조건축문화재의 흰개미 피해를 줄이기 위한 방안으로 피해 건물의 긴급 방제 실시, 다양한 토양 처리법의 선택적 적용, 건물 기단 상면의 토양 처리 실시, 고내구성 흰개미 군체 제거제의 개발과 적용, 다수의 목조건축물을 포괄하는 방제 계획의 수립과 시행, 통합적 흰개미 관리(ITM)의 문화재 적용, 문화재 소유자와 관리자에 대한 교육 등을 제안하였다.

주제어 목조건축문화재, 흰개미, 군체 제거, 통합적 흰개미 관리, 면적 방제

투고일자 2021. 03. 30. ● **심사일자** 2021. 04. 21. ● **게재확정일자** 2021. 04. 29.





I. 서론

목재는 천연 유기 재료(organic material)의 일종으로 주변에서 쉽게 구할 수 있고 일정 기간이 지나면 재생산되며 재료로서 여러 장점이 있어 인류 생활의 다양한 부분에서 사용되고 있다. 우리 조상들 또한 목재를 다양한 용도로 사용해왔으며 현재까지 전래된 다양한 형태의 목조문화재들이 남아 있다.

목조문화재(wooden cultural heritage)의 여러 유형 중 목조건축문화재(wooden architectural heritage)는 다양한 요인에 의해 손상되며, 이 중 가장 파괴적인 요인은 곤충이나 미생물 등에 의한 생물학적 손상이다. 특히 국내 목조건축물에 가장 큰 피해를 입히는 생물종은 흰개미(termites)와 목재부후균(wood rot fungi)이다.

흰개미는 체내 공생자(symbiont) 및 효소를 이용하여 식물질을 분해시켜 에너지원으로 사용할 수 있다. 따라서 목재나 목구조물, 농작물 등을 손상시켜 막대한 경제적 피해를 입힌다. 대만지중흰개미 또는 집흰개미(Formosan subterranean termite, *Coptotermes formosanus*)와 아시아지중흰개미(Asian subterranean termite, *Coptotermes gestroi*) 등 *Coptotermes* 속(屬)과 동부지중흰개미(Eastern subterranean termite, *Reticulitermes flavipes*) 등 *Reticulitermes* 속으로 인한 경제적 피해는 전 세계적으로 매년 400억 달러에 달한다(Rust·Su 2012: 356).

우리나라에서도 목조주택과 한옥, 목조건축문화재를 중심으로 다수의 흰개미 피해가 확인되고 있으며 피해 지역은 제주도(Park 외 2013: 137) 등 주요 도서 지역을 포함한 국내 전역이다. 흰개미는 현재 전 세계적으로는 3,106종이 확인되었으며(Krishna 외 2013: 171) 우리나라에서는 지중흰개미(subterranean termite)의 일종인 *Reticulitermes* 속의 3종이 보고되었다. *R. speratus kyushuensis*는 1920년대부터 국내 전역에서 확인되었으며 2015년 *R. kanmonensis*가 금강 유역에서 보고되었고(Lee 외 2015: 351) 이어 2019년 *R. speratus*

(*speratus*(Kolbe)의 분포가 확인되었다(Son 외 2019: 45). *Reticulitermes* 뿐만 아니라 전 세계적으로 가장 큰 경제적 피해를 야기하는 대만지중흰개미도 향후 기후변화에 따라 국내에 침입할 가능성이 높게 추정된다(Lee 외 2021: 431).

흰개미는 주로 지면에서 상부 방향으로 이동하여 기둥 하부나 하인방 등 목조건축문화재의 주요 구성 부재를 손상시킨다. 목재 내부를 가해하여 목조건축물의 구조적 안전성을 저해하고 원재료를 손상시킴에 따라 문화재로서의 진정성(authenticity)을 훼손한다. 흰개미 피해는 발생 후 되돌릴 수 없는 비가역적 피해이며 언제든 어디서나 발생할 수 있어 화재 등 재난과 유사한 특성이 있다.

목조건축문화재의 흰개미 피해는 우리나라의 기후 환경과, 산림이나 구릉에 위치하는 건축문화재들의 입지적 특성 등 다양한 요소들과 관련되어 있다. 또한 향후 지구온난화로 인한 겨울철 기온 상승 등으로 피해가 증가하고 외래종이 유입될 것으로 예상된다(김시현·이상빈 2019: 139).

이 논문에서는 흰개미 방제의 역사와 최근 기술 및 연구 동향에 대해 소개하고, 국내 목조문화재의 흰개미 피해 현황과 조사 방법, 방제법 등을 살펴본 뒤 개선 방안을 도출하여 향후 목조문화재의 원형 보존에 기여하고자 하였다.

II. 흰개미 방제사(史)와 최근 연구 동향

1. 제2차 세계대전 이전

흰개미 방제의 역사가 정확히 언제부터 시작된 것인지 알 수 없지만 인류의 목재 사용과 함께 흰개미 피해도 함께 시작되었으며, 인구 증가 및 사회화에 따른 목재 사용량 증가와 국가 간 교역으로 인한 외래 흰개미의 유입으로 흰개미 피해 또한 증가하였을 것으로 추정된다. 네덜란드의 Kaempfel이 1690년 발간한 『The History of Japan』에서는 일본 지역의 흰개미로 인한 피해에 대해 언급되어 있다(김윤수 외 2019: 117).

상세한 기록이 남아 있는 1900년대 초반부터의 흰개미 방제 방법을 살펴보면 1900년대 초반에는 비소 분말(arsenic dust) 등 무기살충제(inorganic pesticide)를 흰개미 피해가 심한 곳에 뿌리는 방식이 주로 사용되었다. 무기살충제는 인축과 환경에 강한 독성을 보여 새로운 살충제의 사회적 수요가 증가하였으며, 1940년대에는 저렴하고 살충력이 뛰어난 유기염소계 살충제(chlorinated hydrocarbon pesticide)가 다수 개발되어 사용되기 시작하였다(김길하 외 2012: 166).

대표적인 유기염소계 살충 약제인 DDT(Dichloro Diphenyl Trichloroethane)는 1938년 살충제로서의 효과가 발견되고 미국이 태평양 전쟁에서 자국 군인들을 보호하기 위해 대량으로 생산·사용하기 시작하면서 전 세계에서 사용되었다. 흰개미 방제에서도 DDT, Chlordane, Aldrin 등 지속성과 효율성이 우수한 유기염소계 살충제가 다수 사용되기 시작하였다(Su 2019: 117).

한편, 미국에서는 흰개미 피해가 증가함에 따라 Kofoid를 중심으로 흰개미조사위원회(Termite Investigations Committee)가 샌프란시스코 만 지역의 흰개미 피해를 해결하기 위해 조직되었으며, 이들의 최종보고서를 기초로 『Termite and Termite Control』이라는 기념비적 문헌이 발간되었다(Kofoid 1934). 총 54개의 챕터로 구성된 이 책은 건재흰개미(drywood termite), 습재흰개미(dampwood termite), 지중흰개미 등 흰개미의 생태와 방제, 그리고 목재 등 다양한 연구 내용이 기술되어 있으며 흰개미 연구의 시발점으로 여겨진다.

2. 제2차 세계대전 이후

1) 새로운 살충제 개발과 사용

유기염소계 살충제들은 가격이 저렴하고 지속성이 뛰어났기 때문에 광범위하게 사용되었다. 그러나 유기염소계 살충제가 인축이나 환경에 잔류 독성을 보인다는 사실이 점차 밝혀졌으며, 특히 1962년 레이첼 카슨(Rachel Carson)이 발간한 저서 『침묵의 봄(Silent Spring)』은 DDT와 Chlordane 등 당시 광범위하게 사용되던 살충제의 독

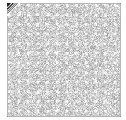
성을 알림으로써 환경운동을 확산시켰고, 결국 시장에서 유기염소계 살충제의 판매가 금지됨에 따라 흰개미 방제 분야에서도 새로운 대안 마련을 위한 연구들을 촉발시켰다(Su·Scheffrahn 1998: 1; Su 2019: 117).

이후 인축과 환경에 저독성이면서 살충력은 뛰어난 새로운 살충제가 개발되기 시작하였다. 유기염소계 살충제를 대체하기 위해 1960년대에는 유기인계 살충제(organophosphate pesticide)들이 개발되었으며, 1970년대에는 카바메이트(carbamate)계 약제가 개발되었다. 1980년대에는 피레스로이드계(pyrethroid) 약제가 개발되었으며 곤충 성장 조절제(insect growth inhibitor)가 등장하였다(김길하 외 2012: 200).

흰개미 방제 분야에서도 1960년대 후반부터 유기인계 약제인 클로르피리포스(Chlorpyrifos), 피레스로이드계 약제인 퍼메트린(Permethrin), 사이퍼메트린(Cypermethrin), 비펜트린(Bifenthrin), 페닐피라졸(phenylpyrazoles)계 약제인 피프로닐(Fipronil), 네오니코티네이드(Neonicotinoid)계 약제인 이미다클로프리드(Imidacloprid) 등이 흰개미 방제 약제로 사용되어왔다(Su·Scheffrahn 1998: 1).

2) 흰개미 군체 제거제의 개발과 사용

흰개미 중 목조건축물이나 구조물에 주로 피해를 입히는 종은 대부분 지중흰개미의 일종이다. 지중흰개미는 외부에 활동하는 일흰개미(worker)를 제거한다 하더라도 생식 계급(reproductives)에 속하는 왕, 여왕이 남아 있다면 다시 일흰개미를 산란하여 피해를 입히기 때문에 군체 전체를 제거하지 않으면 계속해서 피해가 발생한다. 그러나 흰개미 군체의 서식처(nest)는 땅 속이나 나무 속에 있고 생식 계급이 생활하며 알을 산란하는 중심 둥지(central nest)의 위치를 정확히 알기 어렵기 때문에 기존의 살충제로는 흰개미 군체 전체를 제거할 수 없었다. 따라서 기존의 흰개미 방제 방법은 외부 흰개미 군체가 목조건축물 방향으로 유입되지 않도록 보호 대상 주변으로 일종의 화학적 방어벽(chemical barrier)을 만드는



방식이었다.

흰개미가 집단을 이루고 생활한다는 것은 오래전부터 알려져 있었으므로 흰개미 연구자들은 흰개미 군체 전체를 제거하기 위해 노력해왔으며, 최초의 관련 연구는 1930년대까지 거슬러 올라간다. 당시에 주로 사용되던 무기살충제인 비소 분말을 흰개미 피해가 있는 곳에 도포하면 이 약제가 흰개미 군체의 서식처까지 전달되어 군체를 제어할 수 있을 것으로 기대되기도 하였으나, 실험 결과 약제에 직접 접촉한 개체들만 죽는 것이 확인되었으며 (Randall·Doddy 1932: 463), 이후 살충력이 뛰어나며 저렴한 유기살충제들이 발달하면서 군체를 제거하기 위한 연구는 수행되지 않았다.

1960년대 친환경적인 흰개미 방제법 개발의 일환으로 군체 제거의 개념이 다시 논의되기 시작하였다. 이 시기에는 Mirex bait라 불리는 초기 군체 제거제와 관련된 연구가 수행되었다. 디클로란(Dechlorane)은 지효성(slow acting) 살충 약제로 지중흰개미 군체를 제거할 수 있는 가능성이 있다고 보고되었으며(Esenthier·Gray 1968: 827), 동부지중흰개미를 대상으로 현장 시험을 수행한 결과 흰개미 군체를 완전히 제거하지는 못하지만 활동을 억제할 수 있다고 보고되었다(Esenthier·Gray 1968: 827; Ostaff·Gray 1975: 1321). 이런 실패에도 불구하고 일련의 초기 연구들을 통해 흰개미 군체 제거제는 ① 약제를 직접 섭식하는 흰개미 외에 다른 개체들에게까지 영향을 줄 수 있도록 속효성이 아닌 지효성이어야 하며, ② 일흰개미들이 약제가 포함된 먹이를 기피하지 않고 섭식하도록 비기피성(non-repellent)이어야 한다는 개념이 도출되었다.

하지만 이 시기에는 흰개미 군체가 제거되었는지를 확인할 수 있는 방법이 없었기 때문에 연구에 어려움이 있었다. 이 문제를 해결하기 위해 흰개미 군체의 활동을 정량적으로 측정할 수 있도록 하는 지상 표본 채취(on-the ground sampling) 방법(La Fage 외 1973: 45; Tamashiro 외 1973: 721)과 포획-표시-방사-재포획(capture-mark-release-recapture) 방법을 이용하여 군체

의 활성을 정량적으로 평가하는 방법을 고안하였다(Lai 1977).

선행 연구를 통해 흰개미 군체 제거제가 갖추어야 할 2가지 중요한 요건, 즉 지효성과 비기피성이 제시되고 흰개미 군체의 활성을 정량적으로 평가할 수 있는 방법이 마련되자 1980년대부터 이 두 조건을 모두 만족시키는 약제를 찾기 위해 노력하였다. 처음 제시된 약제들은 곤충의 체내 대사를 억제하는 대사억제제(metabolic inhibitor) 계열의 히드라메틸론(hydramethylnon) (Su 외 1995: 1343), avermectin B1(Su 외 1987: 1), sulfluramid(Su·Scheffrahn 1988a: 73), A-9248(Su·Scheffrahn 1988b: 850) 등이었다. 실험실 수준의 연구에서는 성과가 있었으나 장기간에 걸친 현장 적용 연구 결과 흰개미 군체는 제거되지 않고 단지 흰개미 군체의 활동만 줄일 수 있는 것으로 밝혀졌다(Su 외 1995: 1).

이후 후속 연구를 통해 군체 제거제의 필요 조건 중 세 번째 조건인 '양 비의존성 치사 시간(dose-independent lethal time)'이 확립되었다. 이 개념은 흰개미가 섭식하는 약제의 양에 따라 사충률이 달라지면 안 된다는 것이다. 대사억제제와 같은 기존 약제들은 흰개미들의 체내 약제 농도 또는 섭식량과 사충률이 비례하여 증가하는 경향이 있다. 야외 흰개미 군체의 경우 먹이 탐색 활동을 하다가 약제가 포함된 먹이를 직접 섭식한 일흰개미들은 체내 약제 농도가 높아지는데, 직접 섭식하지 않은 다른 개체들은 체내에 약제가 없거나 영양 교환(trophallaxis)이나 동종 포식(cannibalism) 등을 통해 상대적으로 낮은 농도의 약제만이 체내에 축적된다. 이로 인해 체내 약제 농도가 치사량(lethal dose)을 넘은 일부 개체만이 제거되고 체내 약제 농도가 치사량보다 낮은 대다수의 개체들은 생존하여 흰개미 군체가 완전히 제거되지 않고 일시적으로 활동이 저하되지만 하였던 것이다.

흰개미 군체 제거제의 필요 조건 3가지가 규명되자 모든 조건을 만족시키는 약제를 탐색하기 위한 연구가 진행되었고, 곤충 생장 조절제가 다음 후보군으로 주목을

받았다. 다양한 곤충 생장 조절제 중 곤충의 표피를 구성하는 키틴의 합성을 저해시키는 키틴 합성 저해제(chitin synthesis inhibitor, 이하 CSI)가 흰개미 방제에 적합한 약제로 선정되었다.

흰개미는 불완전 변태를 하는 곤충이므로 변태(metamorphosis) 과정 없이 알(egg)에서 종령의 성충(adult)이 될 때까지 여러 번의 탈피(molting)를 거치며, 환경 조건 등에 따라 다르지만 대만지중흰개미의 경우 탈피 주기가 약 45일이 소요된다고 알려져 있다(Kakkar 외 2016: 2175). 키틴 합성 저해제는 곤충의 탈피를 억제하여 결국 죽게 하는데, 흰개미에 적용할 경우 45일의 탈피 기간은 약제가 군체 전체에 영향을 주기에 충분한 기간으로 간주되어 다양한 CSI에 대한 적용 연구가 수행되었다.

다양한 CSI 중 헥사플루무론(Hexaflumuron)과 디플루벤주론(Diflubenzuron)이 대만지중흰개미와 동부지중흰개미를 대상으로 평가되었으며, 이 중 헥사플루무론이 유의한 효과를 보였다(Su·Scheffrahn 1993: 1453). 이후에 미국의 농화학 회사인 다우(Dow agrosience, 현재 Corteva)사에서 헥사플루무론을 유효 성분으로 센트리콘(Sentricon system)이라는 최초의 흰개미 군체 제거제를 개발하였으며, 현장 적용 결과 효과적으로 흰개미 군체를 제거한다고 보고하였다(Su 1994: 389). 그리고 1995년에 처음으로 상용화되어 시장에 출시되었다. 이후 세계 여러 지역에서 다양한 흰개미 종을 대상으로 다양한 흰개미 군체 제거제를 개발하고 적용 연구를 수행하였으며, 현재는 Sentricon(유효 성분: Noviflumuron), Advance(유효 성분: Diflubenzuron), Terminate(유효 성분: Hexaflumuron), Trelona(유효 성분: Novaluron), Exterra(유효 성분: Chlorfluzuron), Xterm(유효 성분: Bistrifluron) 등의 군체 제거제가 판매되고 있다(Su 2019: 123). 국내에서는 CSI 계열을 사용한 방제 제품으로 캐치 맨트랩(유효 성분: Bistrifluron)이 시판되고 있다.

3. 최근 연구 경향 (2000년대 이후)

흰개미 군체 제거제의 개발과 상용화 이후에도 친환경

적이며 효율적인 흰개미 방제를 위한 연구들이 수행되고 있다. 2000년대 이후 흰개미 방제 관련 연구들은 크게 ① 토양 처리법과 군체 제거법의 특성을 규명하고 효율성을 높이거나, ② 새로운 형태의 약제를 개발하거나, ③ 종합적 유해 생물 관리(Integrated Pest Management, IPM)의 개념을 차용하여 흰개미 방제에 적용하거나, ④ 개별 건물을 넘어 건축물군(群)을 보호하는 면적 개념을 적용하는 방향으로 전개되고 있다.

1) 토양 처리법과 군체 제거법의 비교 연구

흰개미 군체 제거제의 개발 이후 흰개미 방제는 토양 처리(soil treatment)와 군체 제거의 2가지가 주로 사용된다(임익근·정용재 2019: 177). 토양 처리는 지중흰개미가 목조건축물 주변으로 유입되지 못하도록 주변 토양이나 건물 하부에 화학적 방어벽(chemical barrier)을 형성하는 방법인데, 비용이 저렴하면서도 약제에 닿거나 섭식하는 흰개미들이 즉각적으로 반응하여 높은 사멸률을 보이기 때문에 흰개미 방제법으로 오래 사용되어왔다. 2000년대 이후 군체 제거제 관련 연구와 사용이 활발해지면서 2004년 기준으로 미국에서는 흰개미 방제의 2/3가 토양 처리제를 이용하고 1/3이 군체 제거제를 사용한다고 보고되었다(Curl 2004: 28). 이후 두 방제법의 특성, 비교 연구가 다수 수행되었다.

2000년대 초반에는 토양 처리제가 흰개미 군체를 제거할 수 있는지에 대한 연구가 수행되었다. 흰개미가 약제가 처리된 토양을 지나갈 때 표피에 약제가 묻고, 이 약제가 다른 개체들에게 핏아주기(grooming) 등을 통해 수평 전달(horizontal transfer)되고 이를 통해 흰개미 군체가 제거될 수 있다는 연구 결과가 발표되었다(Potter·Hillery 2002: 373). 이 연구들은 토양 처리제를 사용하였을 때 군체 활성을 모니터링하는 시험편에 흰개미 활동이 탐지되지 않았기에 군체가 제거되었을 것으로 판단하였다. 그러나 후속 연구들은 저농도의 약제(0.5, 1ppm)에서도 약제의 효과가 4~8시간 이내로 빠르게 발현되고(Saran·Rust 2007: 495), 토양 처리제의 일종인 피



프로닐의 효과가 영양 교환보다는 공여자(donor)와 수령자(recipient) 간의 접촉(body contact)에 의해서 일어난다는 것이 밝혀졌다(Saran·Rust 2007: 495; Haagsam 2003). 이 결과들이 의미하는 것은 먹이 탐색 활동 중인 일흰개미들이 약제를 묻힌 상태에서 생식 계급이 있는 곳까지 돌아가서 약제를 전달해야 토양 처리제가 흰개미 군체를 제거할 수 있는데, 이 가능성이 높지 않다는 것이다(Saran·Rust 2007: 495). 이러한 결과들로 인해 토양 처리제를 이용한 군체 제거 연구는 더 이상 진전되지 못했다.

2010년대에는 현장 및 실험 연구를 통해 토양 처리법과 군체 제거법의 사용 목적과 범위를 명확히 규명해냈다. 기존에도 흰개미 연구자들은 토양 처리를 실시하더라도 흰개미 군체에서 외부로 나와 먹이 활동을 하는 흰개미는 군체 전체의 일부에 불과하기 때문에 토양 처리로 인해 죽는 흰개미들 또한 군체 전체의 일부에 불과할 것으로 추정하였다. 실제로 토양 처리제(피프로닐)를 처리한 곳에서 불과 6m 떨어진 곳에서도 지중흰개미 군체가 활발히 활동하였다(Vargo·Parman 2012: 523). 하지만 군체 제거제(Noviflumuron)를 섭식한 대만흰개미 군체는 약 60~70일 이후에 사멸한 반면 토양 처리제(피프로닐)를 처리한 군체는 실험 기간(90일) 동안 군체의 활성화는 전혀 영향이 없었고, 단지 토양 처리제를 처리한 곳으로는 흰개미가 지나다니지 않았다(Chouvenc 2018: 2317).

이상의 결과들을 통해 토양 처리는 흰개미 군체를 직접 제거할 수 없으며 외부에서의 유입만을 방지하는 효과가 있다는 것이 확실해졌으며, 건물 주변의 흰개미 군체를 직접 제거하기 위해서는 군체 제거제가 사용되어야 한다는 결론이 도출되었다.

2) 효율적인 군체 제거를 위한 연구

헥사플루무론을 이용한 군체 제거제 성공 이후 Bistrifluron, Leufenuron, Chlorfluazuron, Noviflumuron, Novaluron, Diflubenzuron 등의 다양한 CSI 계열 약제가 *Reticulitermes*와 *Coptotermes* 속 흰개미의 군체 제거제로 사용될 수 있을지에 대해 연구가 수행되었고 대체적으

로 긍정적인 효과를 보였다(Evans·Iqbal 2015: 897). 그러나 다음과 같은 흰개미 군체 제거제의 여러 단점 또한 확인되었다. ① 흰개미 군체를 제거하기까지 소요되는 시간이 길고, ② 주기적인 모니터링과 약제 교체 등에 인력과 비용이 소모되며, ③ 땅 속에 설치된 군체 제거제가 일정 기간이 지나면 손상되어 교체해야 하고, ④ 목조건축물 주변 토양에 설치한 뒤 흰개미가 유인되어야만 효력을 발휘할 수 있다는 것이다. 이러한 단점들을 극복하기 위해 여러 후속 연구들이 수행되고 있다.

(1) 군체 제거제의 소요 기간 단축을 위한 연구

선행 연구 결과 흰개미의 종과 군체의 크기 및 약제의 종류에 따라 군체 제거에 걸리는 시간은 다양하였지만 평균적으로 100~150일가량이 소요되었다(Evans·Iqbal 2015: 897; Su 2019: 126). 이에 군체 제거에 필요한 기간을 단축시키기 위해 각 세부 과정을 분석한 결과, 군체 제거제가 흰개미 군체를 제거하는 데까지 세 단계가 필요하였다. 1단계는 흰개미들이 군체 제거제에 유입되는 단계로, 이 단계에 소요되는 시간을 interception time이라 한다. 2단계는 유입된 흰개미들이 군체 제거제를 섭식하기 시작하여 군체에 영향을 줄 수 있을 만큼 유의미한 양을 섭취하는 단계로, 이 단계에 소요되는 시간을 bait toxicant acquisition time이라 한다. 마지막 3단계는 섭식된 약제로 인해 실제 흰개미 군체가 제거되는 단계로, 이 과정에서 소요되는 시간을 lethal time이라 한다(Su 2019: 122).

1단계의 interception time을 줄이기 위해서는 더 많은 군체 제거제를 설치하거나 군체 제거제 주변에 보조 스테이션을 설치하면 흰개미들이 군체 제거제를 발견할 확률을 높일 수 있다(Paysen 외 2001: 623). 또한 흰개미 유인 물질(attractant)을 첨가하여 interception time을 줄이기 위한 연구들도 수행되었는데, 아미노산·설탕·이산화탄소·음료수 등을 평가한 결과 현재까지 유의미한 결과를 나타낸 물질은 확인되지 않았다(Evans·Iqbal 2015: 897).

2단계의 bait toxicant acquisition time과 3단계의 lethal time은 흰개미의 탈피 기간과 관련되어 있다. CSI 약제가 군체를 제거하는 과정은 약제를 섭식하거나 전달 받은 흰개미 개체들이 탈피하지 못함으로써 죽게 되고, 이것이 반복되다가 군체를 유지할 수 없는 수준에 이르게 되면 흰개미 군체 전체가 제거되는 것이다. 따라서 탈피에 걸리는 시간을 인위적으로 단축시키면 흰개미 군체가 더 빠르게 제거될 것으로 추정하고 관련된 연구들이 시도되었다(Su·Monteagudo 2017: 1736; Carnohan·Su 2018: 2312, Carnohan 외 2021: 218).

실내 실험 결과 곤충 탈피 호르몬을 섭식한 흰개미들은 기존에 군체를 제거하기 위해 필요한 시간(실내 실험 기준 약 90일)을 최대 14일 이내로 단축시킬 수 있다고 보고되었다(Carnohan·Su 2018: 2312). 후속 연구를 통해 군체 제거제에 곤충 탈피 호르몬 등을 첨가하여 더 빠르게 흰개미 군체를 제거할 수 있을 것으로 기대된다.

(2) 군체 제거제의 효율성 향상과 내구성 강화를 위한 연구

① 전자 센서와 자동 모니터링 장치

초기의 흰개미 군체 제거는 건물 주변에 일정 간격을 두고 군체 제거제 설치 ⇒ 일정 기간마다 사람이 직접 모니터링 ⇒ 흰개미 발견 시 독먹이 교체 순으로 이루어졌다. 이때 흰개미들이 약제를 잘 섭식할 수 있도록 CSI 약제를 목재나 종이 등 흰개미가 좋아하는 셀룰로오스 기반 물질에 처리하여 사용하였다. 따라서 땅 속에 설치된 후 토양 내 수분, 미생물 등에 의해 손상되어 약제의 지속력이 떨어지는 문제가 있었으며, 모니터링과 약제 교체 등을 위한 노동력이 지속적으로 필요했다(Su 외 2001: 111; Su, 2002: 975).

이 단점을 보완하기 위해서 2000년대에 목재 시편에 전기 회로를 부착하여 모니터링 스테이션을 개봉하지 않고 흰개미 피해를 탐지하는 기술이 개발되었으며, 아시아지중흰개미 종의 5개 군체를 대상으로 한 현장 적용 연구에서 약 90%의 정확도를 보였다. 이후에도 모니터

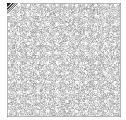
링 장비에 각종 통신 장비와 데이터 로거(data logger)를 결합하여 원거리에서 모니터링 장소를 방문하지 않고 흰개미 유입 여부를 판단하는 장비도 개발되었다(Su 2001: 1518). 현장 적용 연구 결과 탐지 정확도가 이전의 장비보다 높았지만 가격이 비싸고 후술될 고내구성 군체 제거제(durable bait)의 등장으로 사용하지 않게 되었다.

② 고내구성 군체 제거제의 개발과 사용

앞서 언급된 것처럼 땅 속에 설치된 군체 제거제는 시간이 지나며 손상되는 문제가 있어 이를 해결하기 위한 연구들이 수행되었다. 첫 번째 해결 방안으로 밀폐형 군체 제거제(hemetically sealed bait)가 개발되었다(Su 2007: 475). 이 제품은 기존의 군체 제거제를 폴리에틸렌 시트(polyethylene sheet)로 밀봉한 후 겉면에 무선 주파수 인식(Radio Frequency Identification, RFID) 센서를 부착하여 흰개미가 군체 제거제를 섭식할 때 탐지할 수 있도록 하였다. 현장 적용 연구 결과 높은 정확도와 함께 12개월 동안 군체 제거제가 온전히 보존되어 새로운 가능성을 보여주었다.

이 연구 결과는 기존의 군체 제거제 처리 과정에 근본적인 의문을 제기하였다. 땅 속에 설치된 후 오랜 기간 동안 원래의 성능이 유지된다면 굳이 일정 기간마다 모니터링하고 교체할 필요가 있을까? 라는 점이다. 지속적인 모니터링 과정이 없다면 비용을 절감할 수 있을 뿐 아니라 잦은 모니터링이 이미 유인된 흰개미들을 쫓아낼 수 있다는 단점도 없으므로 보다 효율적인 군체 제거가 가능할 것이다.

이를 구현하기 위해서 합성수지를 기반으로 새로운 고내구성 제형이 개발되었다(Eger 외 2011: 651). 목재 시편편과 고내구성 제형을 비교한 현장 적용 연구 결과 흰개미들이 유입될 확률이 더 높았으며 더 많이 섭식하였다. 또한 최소 1년 동안 원래의 형태를 유지하며 흰개미가 섭식하는 것을 확인하였다. 후속 연구에서는 고내구성 재료에 군체 제거용 약제(Nonoviflumuron)까지 첨가하여 평가하였는데, 그 결과 땅 속에서 최소 5년 동안 원형을 유지하였으며 5년 이후의 약제 농도 또한 큰 변화를



보이지 않았다(Eger 외 2014: 1201). 이 현장 연구가 수행된 곳이 여름에는 온습도가 높고 겨울에도 영하까지 기온이 내려가는 곳이라는 점을 감안할 때 고내구성 군체 제거제가 모니터링 단계를 생략할 수 있으며 장기간 동안 건물의 흰개미 피해를 예방할 수 있을 것으로 보고되었다(Eger 외 2014: 1201; Su 2019: 115). 결국 이러한 고내구성 군체 제거제가 상용화되어 판매되기 시작하였으며(제품명 Sentricon HD) 군체 제거제의 효율성을 높여 군체 제거제 전반의 사용량을 확대하는 결과를 가져와 2014년 미국을 기준으로 흰개미 군체 제거제의 사용량이 38%에서 68%으로 약 2배 증가하였다(Su 2019: 115). 또한 고내구성 군체 제거제의 개발은 후술될 '흰개미 청정 구역(area-wide termite free zone)' 또는 '공간적 흰개미 관리(area-wide termite management)'를 가능하게 만들었다.

(3) 목적형 군체 제거제 개발 연구

① 지상 부착형 군체 제거제(Aboveground station)

상기한 바와 같이 땅 속에 매립하는 형태의 초기 군체 제거제는 개발 당시부터 근본적인 한계를 가지고 있었다. 목조건축물 내부에 흰개미 피해 흔적 또는 흰개미 가해가 진행 중인 흔적이 발견되더라도 군체 제거제는 집 외부의 땅 속에 설치되어야 하며, 이미 집 내부에 피해를 입히는 군체를 제거하기에 어려울 수 있다는 점이 있었다. 또한 *Coptotermes* 속의 일부 종은 지면과의 접촉이 없는 공중형 서식처(arboreal nest)가 발견되는데, 기존 군체 제거제는 지면을 통해서만 흰개미 군체와 접촉이 가능하므로 공중형 군체의 방제가 불가능하였다. 이러한 단점을 극복하기 위해 흰개미 피해가 발생한 곳에 즉각적으로 설치할 수 있는 형태의 지상 부착형 군체 제거제(aboveground station)가 개발되었다(Su 외 1997: 809; Su 외 2001: 111).

이러한 제형의 제품들은 흰개미들이 지나다니는 흰개미 길(foraging tunnel)을 조금 손상시킨 후 그 위에 제품을 설치하면 흰개미들이 바로 약제를 섭식하게 한다. 이러한 제품의 개발은 종전에는 흰개미를 방제하기 힘들

었던 면적이 큰 호텔, 콘도, 지붕 등의 건축물과 가로수 등의 살아 있는 나무에서도 흰개미 군체의 방제가 가능하도록 하였다(Yates·Grace 2000: 333).

② 유체형 군체 제거제(Fluid bait)

부착형 군체 제거제의 개발 이후에도 현장 적용과 관련된 문제점들이 지속적으로 확인되었다. 흰개미 피해가 있지만 외부로 드러난 흰개미 길의 길이가 없거나, 건물의 기둥이 원형이어서 사각형의 제품을 완벽히 기둥에 밀착시키지 못하는 등의 문제가 확인되었다. 또한 부착형 군체 제거제를 설치하였을 경우 관계인(소유자 및 관리자 등)에게 흰개미의 존재를 지속적으로 상기시키는 문제도 있었다. 이는 소유자나 관리자들이 부착형 군체 제거제를 불필요하게 개봉하는 등의 외부적 자극을 가하여 흰개미들이 군체 제거제로 유인되지 않게 하는 등의 문제점이었다. 이에 목재 내부의 흰개미가 다니는 통로에 약제를 직접 주입할 수 있도록 하는 유체형 군체 제거제(fluid bait)가 개발되었고(Su 2015: 274), 현장 적용 연구를 수행하였다(Su 외 2018: 1806). 현재 상용화된 유체형 군체 제거제는 90%의 메틸셀룰로오스 용액(methylcellulose solution)과 10%의 건조제(dry medium)로 구성되어 있는데, 이를 실리콘 건으로 흰개미 피해흔이 있는 곳이나 흰개미 길 내에 바로 주입하는 방식이다(Su 외 2018: 1806). 흰개미 길에 약제가 스며들고 흰개미가 약제 처리된 곳을 지나가며 나무를 섭식함에 따라 군체가 제거되었다.

(4) 분말형 흰개미 제거제 개발 연구

이미 흰개미 피해가 발생하였거나 발생 중인 목조건축물에서는 흰개미 군체 제거제를 설치하더라도 언제 흰개미가 유인되어 군체를 제거할 수 있을지를 정확히 예측하기 어려운 단점이 있어, 추가적인 피해 발생을 막는 긴급한 조치로 분말형 흰개미 방제 약제(dust-type termiticide)를 적용한 사례도 있다. 분말형 약제는 본래 군체의 규모가 작고 먹이 활동 범위가 넓지 않은 건재흰개미 또는 습재흰개미의 방제법으로 사용되었으며, 이를

지중흰개미에 적용한 연구들도 수행되었다.

1990년대에 DOT(Disodium Octaborate Tetrahydrate)나 붕산아연(Zinc Borate), 붕산(Boric Acid) 등을 분말화하여 대만지중흰개미와 동부지중흰개미 등의 방제에 적용하였으며, 2010년대에는 피프로닐을 유효 성분으로 한 분말형 약제의 지중흰개미 방제 연구가 수행되었다(Gautam 외 2012: 1766; Gautam·Henderson 2014: 82; Li 외 2016: 1046; 임익균·정용재 2019: 227).

현재 사용되는 분말형 약제들은 비기피성 살충 약제와 셀룰로오스 분말 등을 혼합하여 흰개미들이 기피하지 않도록 제작되었으며, 흰개미 피해가 확인되거나 서식이 의심되는 목재 지점에 1~10mm 정도의 구멍을 낸 뒤 내부로 약제를 분사하여 흰개미들이 이곳을 지나치며 약제에 노출되도록 한다. 약제 살포 후 이곳을 지나치는 흰개미 개체들은 표피에 약제가 부착되어 직접적인 살충 효력이 발생하며, 다른 개체들에게도 핏아주기(grooming) 등을 통해 약제가 전달될 가능성이 있다(임익균 외 2019: 177). 분말형 약제는 토양 처리제를 목부재에 직접 처리하는 것과 같은 효과를 보인다. 따라서 피해가 진행 중인 부재의 긴급 방제에는 적용이 가능하나, 다른 피해가 없는 목부재로 흰개미를 이동시킬 수 있는 위험을 내포하고 있어 주의해야 한다.

3) 통합적 해충 관리(IPM)의 발달과

통합적 흰개미 관리(ITM) 적용

최근 친환경이 강조되며 통합적 해충 관리(Integrated pest management, IPM) 개념이 여러 분야에서 적용되고 있고 흰개미 방제에도 IPM 또는 ITM(Integrated termite management) 개념이 도입되어 적용되고 있다. IPM은 농업 해충의 방제에서 그 개념이 정립되었는데(Kogan 1998: 243), 이 개념은 경제적 가해 수준(Economic Injury Level, EIL) 또는 경제적 피해 허용 수준(Economic Threshold Level, ETL)을 설정하고 해충을 방제함에서 얻는 기대 수익이 해충으로 인한 손실보다 클 때 해충 방제를 시행해야 한다는 것이다. 즉 해충이 발견될 때 무조건적인 방제를

시행하는 것보다 해충 방제의 비용-편익을 분석하여 방제해야 한다는 것이다.

흰개미에서의 IPM 개념 도입은 흰개미를 방제하지 않았을 때의 손실과 흰개미를 방제함으로써 얻는 기대 수익의 평가가 어려워 경제적 가해 수준을 설정하기 어려웠다. 그러나 흰개미를 방제하는 데 드는 비용은 흰개미 피해 이후 건물의 보수 비용보다 저렴하므로, 지속적인 방제를 통해 건물 주변의 군체나 활성을 일정 수준 이하로 유지하여 흰개미 피해가 발생하지 않도록 관리한다면 비용-편익 분석 관점에서 정당화될 수 있다.

ITM은 기존의 화학적 방제법만 사용하는 것이 아니라 물리적 방제법, 건물 주변의 상시 관리, 군체 제거 등 사용할 수 있는 모든 방법을 고려하여 전체적인 비용과 편익을 추정하는데, 이 외에도 환경과 인축 등에 미치는 영향도 고려해야 한다. 기존에 흰개미 방제에 사용된 약제의 양은 390kg/ha인 데 반해 농업 해충 방제에는 2.17 kg/ha으로 많은 차이가 있다(La Fage 1986: 45). 따라서 사용하는 살충제의 양과 농도가 환경 또는 인체에 영향을 줄 수 있으므로, 화학 약제는 꼭 필요한 소량만을 사용하면서 주변의 흰개미 군체를 제거할 수 있어야 진정한 의미의 IPM이 가능하다(Su·Scheffrahn 1998: 1). 키티 합성 저해제를 이용한 군체 제거제들은 사용되는 약제의 양이 토양 처리제에 비해 약 1/600 정도의 미량인 반면 흰개미 군체를 효과적으로 제거할 수 있으므로 ITM에서 중요한 요소가 될 수 있다.

4) 공간 차원에서의 흰개미 방제

(Area-wide termite management)

기존의 흰개미 방제법은 특정 대상을 정하고 이 대상을 어떻게 보호할 것인가에 대한 것이었다. 이 방식의 문제점은 특정 건물을 보호하기 위해 토양 처리 등을 실시하더라도 주변의 흰개미 군체는 그대로 남아 있으므로 흰개미가 유입될 확률은 높은 상태로 유지된다는 것이었다. 하지만 흰개미 군체 제거제가 개발됨에 따라 목조건축물을 포함한 그 주변의 광범위한 지역을 대상으로 흰개



미 군체 제거가 가능해졌고, 기존의 개별 건축물 보존을 넘어 일정 구역 전체의 흰개미 밀도(population density)를 줄이는 것 또한 가능해졌다.

군체 제거제의 상용화 이후 1999~2005년 칠레의 수도 산티아고에 있는 세로 나비아(Cerro Navia) 마을에서 동부지중흰개미를 대상으로 처음으로 공간적 흰개미 관리(Area-wide termite management, AWM)가 수행되었다(Smith 외 2006: 253). 1999~2000년에는 넓은 지역(2.1ha)의 흰개미 군체 활동을 관찰하기 위해 모니터링 장비를 설치하고 목재 시편을 투입하였다. 흰개미 활동이 관찰된 모니터링 스테이션은 군체 제거 약제로 교체하였으며 장기간에 걸쳐 목재 시편 섭취량과 흰개미 활동 여부를 조사하였다. 그 결과 군체 제거 약제가 투입됨과 동시에 흰개미의 목재 섭취량이 현격히 감소하였으며 3개월 뒤에는 유의미한 수준의 목재 섭식이 나타나지 않았다. 2년 동안의 군체 제거 결과 이 지역 전체에서 활동성이 있는 흰개미 군체가 확인되지 않아 해당 지역 전체에서 흰개미 방제에 성공했다(Smith 외 2006: 253).

이 당시 사용하였던 군체 제거제는 초기 모델로서, 모니터링과 약제 교체 등에 많은 시간이 필요했다. 이후 미국 캘리포니아 남부 지역에서 또 다른 AWM 프로젝트가 2년간 진행되었고, 160개의 모니터링 스테이션에서 관찰되던 흰개미의 활동이 단지 몇 개의 모니터링 스테이션에서만 관찰되어 종료한 사례도 있었다(Getty 외 2007: 1). 또한 미국의 뉴올리언스 주의 루이 암스트롱 공원(Louis Armstrong Park)에서 대만지중흰개미를 대상으로 대규모 AWM 프로젝트를 진행하였다(Su 2019: 115). 이 프로젝트는 총 5단계의 세부 프로젝트로 나뉘어져 있는데, 1단계로 1998~2001년 동안 흰개미 군체 조사를 실시하고 2단계로 2001~2002년 동안 소수의 군체를 제거한 다음 인접한 다른 군체의 활동을 조사하였다. 3단계로 2002~2004년 동안 확인된 모든 군체를 제거하였으며 4단계로 2004~2009년 동안 군체를 제거한 이후 주변 지역에서 새로 유입되는 흰개미 군체를 모니터링하였다. 5단계에서는 2010~2014년 동안 고내구성 군체 제거제를 활용

하여 흰개미 군체를 제거하였다.

이 공원의 면적은 32에이커(129,502m²)에 달하며 1단계 기간 동안 13개의 *C. formosanus* 군체가 확인되었다(Husseneder 외 2003: 61). 2단계 조사에서 흰개미 군체가 제거되면 인접한 곳에 있던 또 다른 군체가 영역을 확장한다는 사실이 밝혀졌다(Messenger 외 2005: 916). 3단계에서는 모든 군체가 곤충 생장 조절제를 이용하여 제거되었고, 2004년 조사 당시 흰개미의 활동이 완전히 사라졌다(Mullins 외 2011: 1687). 하지만 4단계 기간 동안 군체 제거 약제를 사용하지 않고 모니터링한 결과 새로운 흰개미 군체가 유입되어 흰개미 군체 제거 이전과 비슷한 수준으로 늘어났다(Su 외 2016a: 1326). 5단계에서는 고내구성 군체 제거제를 이용하였으며, 그 결과 고내구성 군체 제거제의 새로운 장점이 발견되었다(Su 외 2016b: 809).

고내구성 군체 제거제는 원래 기존 군체 제거제의 모니터링-약제 교체 단계를 줄여 노동력과 비용을 줄이기 위해 고안되었지만, 이 현장 연구 결과 고내구성 군체 제거제를 섭식한 군체가 제거된 이후에도 장기간 효력을 유지하기 때문에 이후에 주변에서 새로 유입되는 흰개미 군체도 순차적으로 제거할 수 있었다. 즉 현재 있는 흰개미 군체를 제거함과 동시에 추후 발생할 수 있는 새로운 흰개미 군체도 제거하는 예방적 역할을 할 수 있다는 것이다.

III. 목조건축문화재의 흰개미 피해 현황과 조사 및 방제

1. 목조건축문화재 흰개미 피해

1) 목조건축문화재 지정 현황

현재 국가지정문화재로 지정된 목조건축물은 국보 25건, 보물 196건, 국가민속문화재 191건으로 총 412건이다. 이 외 사적, 명승 등으로 지정된 곳에서도 다수의 목조건축물이 있으며, 여러 동의 목조건축물이 1건의 문화재로 지정된 대상들도 다수 있다. 또한 지방지정문화재나 비지정 목조건축문화재를 포함하면 그 수량은 수천 건에 달한다.

표 1 국가 지정 목조건축문화재 지정 현황(2021.1.1. 기준)

	국보	보물	국가민속문화재	계
수량	25	196	191	412

2) 국내 목조건축문화재의 흰개미 피해

우리나라의 흰개미 서식은 1920년대 일본인 학자들에 의해 부산·마산·군산·전주·경인지역·개성·평양 등에서 처음 확인되었으며 광복 이후에는 큰 관심이 없다가 1980년대 이후 국립문화재연구소에서 파주 공순영릉 비각·양산 통도사·의성향교·안동 하회마을·장성 백양사·함양 민가·강릉향교·청도 대비사 등 다수 문화재에서 흰개미 피해를 확인한 바 있다(한성희 외 1998: 145).

1999년 전국 85건의 목조건축문화재 조사 결과 14건에서 흰개미 피해가 확인되었으며, 유네스코 세계문화유산인 종묘 정전(국보 제227호)에서도 후면 기둥 등 다수의 부재에서 흰개미 피해가 확인되어 정전 보수와 주변 수림의 흰개미 방제 처리가 실시되었다(이규식 외 2000: 5). 또한 이후 궁궐문화재에 대한 조사에서도 경복궁·창덕궁·창경궁·덕수궁·종묘에서 흰개미 피해가 확인되었다(이규식 외 2001: 41).

이 외에도 합천 해인사에서는 1998년부터 흰개미 피해가 확인되어 2002년까지 국립문화재연구소에서 주변 수림과 경내 목조건축물 주변을 모니터링한 결과 1999년부터 유네스코 세계문화유산인 합천 해인사 장경판전(국보 제52호) 인접 지역에서도 흰개미 서식이 확인된 바 있다(정소영 외 2002: 77).

이후 2009년 한국전통문화대학교에서 전국 16곳의 목조건축문화재와 그 주변 건물 231동의 흰개미 피해를 조사하였으며, 그 결과 78개 동에서 흰개미 피해가 확인되었다(김대운 외 2010: 77).

흰개미 피해가 증가하고 주기적 조사의 필요성이 확대되자 2013년부터 국립문화재연구소 보존과학연구실(2017년 이후 복원기술연구실에서 실시)에서 매년 국가 지정문화재를 대상으로 목조건축문화재 생물 피해를 조사를 수행하고 있다. 조사 결과 전국 목조문화재 312건 중

약 80%에 달하는 252건에서 흰개미 탐지건의 반응이 나타났다고 보고하였다(김영희 외 2019: 117).

또한 2018~2019년 국립문화재연구소 및 문화재돌봄사업단이 실시한 전국 2,805개의 목조문화재 흰개미 피해 조사 결과를 분석한 결과 486건의 목조건축문화재에서 흰개미 가해흔이 확인되었다(임익균 외 2021). 이 중 흰개미 피해가 진행 중이거나 인접한 곳에서 흰개미 군체 서식이 확인된 대상은 143건으로, 흰개미 가해흔이 확인된 대상의 약 30%에 달하는 것으로 조사되었다.

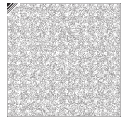
3) 목조건축문화재의 흰개미 조사 방법

2000년대까지의 흰개미 피해 조사는 문화재청 국립문화재연구소와 산림청 국립산림과학원 등 관련 분야의 연구기관에 의해 이루어졌으며, 주요 조사 내용은 육안 조사를 통해 당해 문화재의 흰개미 피해 여부를 확인하거나 주변 수림의 흰개미 군체 서식 여부를 확인하는 것이었다. 이후 흰개미 피해가 확산되고 문화재 소유자 및 관리자 등에게 흰개미 피해에 대한 인식이 확대됨에 따라 적절한 피해 조사와 방제에 대한 수요가 증가하였다. 또한 문화재 보존 관리의 패러다임이 예방 보존으로 전환되며 상시 관리와 정기적인 모니터링이 강조되어 목조건축문화재의 흰개미 피해 조사 방식도 변화하고 있다. 그 주요 내용은 다음과 같다.

(1) 각종 장비를 이용한 조사

흰개미는 목재 내부를 가해하기 때문에 피해 여부를 알기 어렵고, 흰개미 피해 흔적을 외부에서 육안으로 확인하였을 때는 이미 피해가 상당히 진전된 경우가 많다. 이에 흰개미 피해를 보다 빠르고 정확하게 조사하기 위해 각종 비파괴 탐지 장비와 흰개미 탐지견 등이 활용되기 시작하였다.

비파괴 탐지 장비로는 목재 자체의 손상도를 조사하는 장비와 목재 내부에 흰개미 개체들이 활동 중인지 조사하는 장비가 있다. 흰개미로 인한 목재 자체의 결함을 탐지하는 장비는 천공저항시험기(Resistograph)나 초음파 탐



지 장비 등이 있으며, 흰개미 개체의 활성을 탐지하는 장비는 극초단파(Microwave) 탐지 장비나 음향탐지기(Sonic detector) 등이 있다. 이 중 극초단파 탐지 장비는 비파괴로 동일 부재를 반복적으로 검사할 수 있으며 목재 심부까지 조사할 수 있어(김대운 외 2010: 77) 널리 활용된다.

흰개미 탐지건은 개의 발달된 후각을 통하여 목재 내부의 흰개미 서식 여부를 확인하는 방법으로, 단시간에 다수의 목조건축물을 조사할 수 있어 조사 효율성이 높고 탐지율도 높은 장점이 있다(정소영 2010: 121). 흰개미 개체가 현재 활동하지 않더라도 잔여 분비물, 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compound, VOC) 등을 탐지할 수 있어 극초단파 탐지 장비와 함께 국가 지정 목조건축문화재의 흰개미 피해 조사에 활용되었다.

(2) 정기적인 흰개미 피해 조사 수행

목조건축문화재의 흰개미 피해 증가에 따른 예방적 보존 관리 체계 구축을 위해 국가지정문화재와 지방지정문화재를 대상으로 정기적인 흰개미 피해 조사가 수행되고 있다. 국립문화재연구소에서는 국가 지정 목조건축문화재(국보·보물·중요민속자료)를 대상으로 ‘목조문화재 가해 생물종 조사’를 수행하고 있으며, 문화재청이나 지방자치단체 등의 요청에 따른 수시 조사를 실시하고 있다.

또한 전국 광역단체별 문화재돌봄사업단 모니터링팀이 지방지정문화재와 일부 국가지정문화재를 대상으로 매년 정기 조사를 실시하고 있다. 문화재돌봄사업단은 문화재의 상시 관리와 예방적 보존을 위해 2010년 신설되었으며 경미보수팀과 모니터링팀으로 구성되어 있다. 이 중 모니터링팀의 주요 업무는 해당 사업단 관할지역 내 국가지정문화재 일부와 지방지정문화재의 보존 현황을 정기적으로 조사하여 적시에 후속 조치가 이루어질 수 있도록 하는 것이다.

(3) 전국 지중흰개미 피해 현황 지도

국립문화재연구소 및 문화재돌봄사업단의 현장 조사 결과를 토대로 전국 목조건축문화재에서 흰개미 피해

가 발생한 곳을 알려주는 플랫폼이 최근에 구축되었다(conservation.cbnu.ac.kr). 이 플랫폼을 통해 문화재 지정별(국가 지정, 시·도 지정) 및 연도별 목조문화재의 지중흰개미 피해 현황 확인이 가능하다(임익균 외 2021).

4) 목조건축문화재의 흰개미 방제

흰개미 피해 조사 결과에 따라 흰개미 피해가 확인되거나 추후 피해가 의심되는 곳은 추가적인 피해를 막거나 외부 흰개미 군체가 유입되지 못하도록 방제 처리를 수행한다. 현재 문화재 방충·방부를 위해 사용되는 생물방제법은 훈증, 방충방부제 처리, 토양 처리, 흰개미 군체 제거 등 4가지 방법이 있으며 이 중 흰개미 방제를 목적으로 수행되는 것은 토양 처리와 군체 제거이다.

토양 처리는 앞서 언급한 대로 외부에 있는 흰개미 군체가 목조건축문화재로 유입되지 못하도록 일종의 차단막을 설치하는 방법이며, 현재 목조건축문화재의 흰개미 피해 방제를 위한 토양 처리는 ‘문화재 수리 표준 시방서(이하 ‘시방서’)와 ‘문화재 수리 표준 품셈(이하 ‘품셈’)에서 다음과 같이 규정하고 있다.

시방서에서는 ‘2100 보존 처리 공사’ 항목의 하위에 ‘2150 토양 처리’를 포함시켜 관련 내용을 규정하고 있는데, 세부 내용을 살펴보면 토양 처리를 ‘건축물을 충해로부터 보호하기 위한 조치’로 정의하고 있으며, 구체적인 처리 방법으로는 ‘기존의 오염된 흙의 표면에 약제를 살포하는 방법’, ‘기존의 흙과 약제를 혼합하는 방법’의 2가지가 있다(문화재청 2020: 390). 품셈에서는 ‘제16장 보존 처리 공사에 ‘16-4 토양 처리’가 규정되어 있으며 실제 공사 시 단위면적당 살충 약제와 거품활성제(계면활성제), 관련 인력 및 공구 손료, 실제 시공을 위한 기준을 제시하고 있다(문화재청 2019: 346).

일반 목조건축물의 흰개미 피해 예방을 위한 토양 처리는 ① 건물 주변에 일정 간격을 두고(또는 가장자리를 따라) 흙을 파낸 뒤 이 흙을 약제와 혼합하여 다시 매우는 방법, ② 건물 주변에 일정 간격을 두고 구멍을 뚫어 약제를 주입하는 방법, ③ 건물을 짓는 중에 기초부 위

에 약제를 도포하는 방법, ④ 이미 지어진 건물에 구멍을 뚫어 건물 바닥이나 기단 상부에 약제를 주입하는 방법 등이 있다. 이 중 문화재 분야에서 주로 사용되는 방법은 두 번째 방법이며, 문화재 주변의 조경이나 다른 건물 등을 고려했을 때 적절한 방법이긴 하나 방제의 효율성 면에서는 다소 미흡한 점이 있다.

군체 제거는 상기한 바와 같이 흰개미의 생태적 특성을 이용하여 흰개미 군체를 제거하는 방법으로, 시방서나 폼셈 등에서 따로 다루고 있지 않다. 현재 문화재 분야에서 사용되는 군체 제거제들은 초기 모델로서, 건물 주변에 일정 간격을 두고 설치한 뒤 주기적으로 모니터링하고 흰개미가 확인되면 약제로 교체하는 방식이다.

IV. 흰개미 피해 저감을 위한 제안

지금까지 흰개미 방제법의 발달 과정과 최근 연구 동향, 목조건축문화재의 흰개미 피해 현황과 조사 및 방제 방법 등에 대해 살펴보았다. 그 결과 보다 효과적으로 목조건축물의 흰개미 피해를 예방하기 위한 방안을 다음과 같이 도출할 수 있었다.

1. 흰개미 피해 문화재의 긴급 방제 실시

흰개미 피해를 인식하게 되는 것은 봄철 주로 흰개미 유시충이 건물 내부에서 군비하거나, 목부재에서 흰개미 길이 형성되어 있는 것을 확인하거나, 내부 조사 장비를 이용하여 확인한 경우 등이다. 이때부터 후속 방제 조치가 수행될 때까지 짧게는 수개월에서 길게는 1년 이상이 소요되기 때문에 이 기간 동안 추가적인 피해가 발생하지 않도록 긴급 방제 처리를 수행할 필요가 있다.

먼저 하인방이나 기둥, 마루 등 지면과 가까워 흰개미가 유입되기 쉬운 곳을 중심으로 흰개미 피해 범위를 조사한다. 특히 유시충의 탈출공, 흙 길의 위치를 포함해야 하며, 조사 결과에 따라 문화재 재질에 영향을 미치지 않는 다양한 제형의 약제(분말형, 고체형, 유체형 등)를 처리하여 현재 활동 중인 일흰개미들이 더 이상 목조건축

물을 가해하지 않도록 하고, 이후 동일 위치에 부착형 군체 제거제 등 실내에서 사용할 수 있는 군체 제거제 등을 적극 활용하여 건물에 유입된 군체를 제거할 수 있도록 해야 한다.

2. 기존 방제법의 개선

긴급 방제 조치 후 새로운 흰개미 군체가 유입되는 것을 막고 기존의 흰개미 군체를 제거하기 위한 방제 처리를 수행해야 한다. 현재 목조건축문화재의 흰개미 방제법은 주로 토양 처리와 군체 제거를 통해 이루어지고 있으며, 문화재의 특성 등을 고려하여 개선할 방안은 다음과 같다.

1) 토양 처리

현재 토양 처리는 건물 주변에 일정 간격(30cm)을 두고 2줄의 띠 형태로 일정 간격(50cm)에 따라 토양을 천공하여 약제를 가압 주입하는 방식이다. 이 방식은 문화재 경관에 미치는 영향이 적은 장점이 있으나, 약제가 주변 토양에 균일하게 처리되기 어려운 문제가 있다. 그러므로 건물 주변에 일정 간격을 두고 전체적으로 흙을 파낸 뒤 이 흙을 약제와 고루 혼합한 뒤 다시 메우는 방법(trenching)을 관련 규정에 추가하고, 당해 문화재의 상황에 따라 적용할 필요가 있다.

또한 목조건축물 바깥이 아닌 건물 하부 또는 기단 상면의 토양에 약제를 처리하는 것도 유용한 방법이 될 수 있다. 목조건축물 주변에 토양 처리를 실시하는 것은 외부 흰개미 군체의 추가적인 유입은 방지할 수 있지만, 이미 흰개미 군체가 목조건축물 하부로 유입된 상황에서는 큰 효력을 기대하기 어렵다. 건물 하부에서 상부로 흰개미가 유입되는 통로는 주로 초석의 갈라진 틈, 초석 없이 마루 아래에 놓인 기둥 등이므로 건물 하부(마루 아래)나 초석 주변 등에 약제를 처리하면 흰개미가 목조건축물에 유입되는 것을 방지할 수 있다.

이와 유사하게 당해 문화재를 해체 보수하거나 문화재 주변에 새로운 건물을 신축할 때는 기초공사 후 목공



사를 시작하기 전에 기단 상면에 토양 처리제를 도포하는 공정을 추가해야 한다. 미국, 일본 등에서는 신축 건물의 경우 기초공사 후 약제를 2~3회 도포하는 과정이 있는데, 이때 처리된 약제들은 강우를 직접 맞지 않기 때문에 장기간 효력이 유지되어 지중에 있던 흰개미가 목조건축물 쪽으로 올라올 때 이를 차단하는 효과가 있다.

2) 군체 제거

해인사와 종묘에서 흰개미 군체 제거제가 처음 적용된 이후 약 20년 동안 문화재 분야에서 흰개미 군체 제거제가 사용되어왔으나 한계점 또한 나타나고 있다. 전국적으로 흰개미 피해가 나타나기 때문에 흰개미 피해가 확인된 특정 문화재에 매년 예산을 반영하기에는 어려움이 있다. 이로 인해 군체 제거제가 설치된 다음 후속 관리가 이루어지지 않고 일회성 사업에 그치는 경우가 많은데, 앞서 뉴올리언스의 사례에서 알 수 있듯이 초기 군체 제거에 성공하더라도 새로운 흰개미 군체가 주변에서 유입되기 때문에 지속적인 방제 처리를 수행해야 한다.

이 같은 상황에서 외국에서 사용되는 고내구성 군체 제거제가 도움이 될 수 있다. 이 형태의 군체 제거제는 지중에 설치된 뒤 장기간(5년 이상) 효력이 유지되며 굳이 모니터링할 필요가 없으므로 한정된 예산과 인력으로 다수의 목조건축문화재를 관리해야 하는 상황에 적합하다. 현재 수행되고 있는 흰개미 조사 결과를 바탕으로 방제 우선순위를 설정한 뒤 일정 주기에 따라 고내구성 군체 제거제를 시공한다면 보다 효율적인 문화재 관리가 가능할 것으로 추정된다. 현재 국내에서 시판 중인 약제가 없으므로, 국내 환경에 적합한 고내구성 군체 제거제의 도입 및 개발이 적극적으로 요구된다.

3. 흰개미 방제의 패러다임 전환

1) 목조건축물군(群) 보존으로의 관점 전환

기존 목조건축문화재의 흰개미 방제는 피해 조사 결과를 토대로 특정 건물을 보호하는 방향으로 전개되어왔다. 그러나 토양 처리제와 군체 제거제의 효과를 비교한

선행 연구에서 알 수 있듯이 흰개미가 땅 속에 구축한 먹이 탐색 동로(foraging tunnel)망에 약제가 처리되어 이곳을 이용할 수 없게 되면 흰개미 군체는 다른 우회로를 선택하거나 새로운 경로를 만들어 다른 곳의 먹이를 찾아 섭식한다(Chouvenc 2018: 2317). 따라서 토양 처리를 통해 특정 건물을 보호하게 되면 흰개미 군체는 그대로 남아 있으면서 다른 건물을 공격하게 된다.

우리나라 목조건축문화재는 단일 목조건축물만 있는 경우도 있지만 궁·릉·사찰·민속마을·민가·서원·향교 등 다수의 목조건축물이 모여 있는 경우가 많다. 따라서 특정 건축물을 보호하기 위한 방제 처리로 인해 오히려 다른 건축물의 위험성이 높아질 가능성이 있으므로 단일 건물이 아닌 목조건축물군 전체를 하나의 체계 안에서 관리해야 한다.

향후 목조건축문화재의 흰개미 방제는 당해 문화재와 주변 목조건축물의 복합적인 구성, 건물들의 개별적인 특성, 피해를 입은 목조건축물의 위치, 흰개미 군체들의 분포 등을 감안한 방제 계획을 포괄적으로 수립하고 각각의 요소들을 맞춤 적용시키는 방향으로 실시되어야 한다.

2) 통합적 흰개미 관리(ITM)의 적용

최근 사회 전 분야에서 친환경이 강조되고 있으며 흰개미 방제 또는 문화재 보존에서도 동일한 가치가 요구된다. 기존 흰개미 방제법은 주로 화학 약제를 사용하였지만 최근에는 약제의 사용량을 줄이고 경제적 허용 수준을 고려한 다양한 방제법을 통합적으로 적용하는 ITM 개념이 확산되고 있다.

문화재의 ITM은 농업, 임산, 위생 등 기존 분야와는 다른 특징이 있다. 문화재는 그 자체로 대체할 수 없는 가치를 지니며 일단 손상되면 되돌릴 수 없기 때문에 높은 비용을 치르더라도 흰개미 피해 자체가 발생하지 않도록 해야 한다. 따라서 ITM의 중요 요소 중 하나인 경제적 허용 수준을 고려할 필요 없이 다양한 방제법을 통합적으로 적용하여 목적을 달성해야 한다.

기존의 흰개미 방제법은 토양 처리와 군체 제거를

중심으로 전개되었는데, 여기에 기존에 적용되지 않았던 다른 방제법을 통합적으로 적용하는 것이다. 예를 들어 흰개미가 땅 속에서 지상의 목조건축물로 유입되는 것을 물리적으로 차단하는 망(mesh) 또는 입자 형태의 물리적 유입 방지 장치(physical Barrier)를 건물 하부에 설치하거나, 어둡고 습도가 높게 유지되는 마루 하부 공간에 흡습성 토양 광물이나 조습제를 두거나, 평상시 폐쇄되어 습한 환경이 유지되는 제창 건물 등은 주기적으로 환기하거나, 목조건축물 주변에 흰개미의 먹이가 될 수 있는 장작·나무 그루터기·낙엽 등을 치우는 등 일상적인 관리 활동도 중요한 구성 요소가 될 수 있다.

3) 흰개미 피해에 대한 인식 재고와 확산

이미 국내 전 지역에서 흰개미 피해가 다수 확인되고 있으나 소유자·관리자·지자체 담당 공무원 등 문화재 보존 관리 관련자 중 다수가 흰개미 피해의 위험성에 대해 인식하지 못하고 있다. 이에 문화재청에서는 2012년 『문화재 생물피해관리 매뉴얼』을 발간하여 흰개미를 포함한 각종 문화재 생물피해종의 종류와 예방 관리 방법 등을 제시한 바 있으나 아직까지 그 효과는 미비한 실정이다.

흰개미의 피해 예방과 피해 초기의 방제를 위해서는 문화재와 가장 밀접하게 관련되어 있는 문화재 소유자 또는 거주자, 관리자, 돌봄사업단 모니터링팀 등 상시 조사 업무 담당자, 지자체 문화재 담당 공무원 등을 대상으로 흰개미 피해가 언제 어디서든 발생할 수 있다는 점을 인식시키고, 관련 매뉴얼을 개발하여 정기적인 교육을 수행해야 한다.

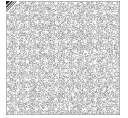
V. 결론

이 논문에서는 흰개미 방제법의 발달 과정과 최근 연구 동향, 국내 목조건축문화재의 흰개미 피해 현황과 조사 및 방제 방법 등을 살펴보고 향후 목조건축문화재의 흰개미 피해 예방에 도움이 될 수 있는 방안들을 도출하

였다. 이를 요약하면 다음과 같다.

1. 흰개미 피해가 발생한 문화재는 피해 범위를 조사하고 유시층 탈출공, 흙 길 등을 포함한 주요 피해 부위 및 건물의 인접 부위에 군체 제거제를 설치한다.
2. 흰개미가 외부에서 목조건축물로 유입되는 것을 차단하기 위한 토양 처리는 건물 주변의 토양을 파낸 뒤 약제를 균일하게 혼합하여 다시 되메우는 방법을 우선적으로 고려한다.
3. 흰개미가 건물 하부에서 기단 상면으로 유입되는 것을 차단하기 위해서는 건물 하부(기단 상면)와 초석 주변 등에도 토양 처리를 실시한다. 또한 당해 문화재의 해체 보수나 문화재 주변에 건물을 신축할 때 기단 상면에 토양 처리를 실시한 뒤 본 건물을 세우도록 한다.
4. 장기간 효력이 유지되고 별도의 모니터링과 약제 교체가 필요 없는 고내구성 흰개미 군체 제거제를 개발 및 도입한다.
5. 기존의 흰개미 방제는 단일 건물 위주로 이루어졌으나 이제는 주변 목조건축물을 포괄하는 종합적인 방제 계획의 수립과 이에 맞는 개별 방제법의 적용이 필요하다.
6. 화학 약제를 이용한 방제법과 함께 물리적 유입 방지 장치, 건물의 일상 관리 등을 포함한 통합적 흰개미 관리(ITM)를 적용한다.
7. 문화재 보존 관리 관계자(소유자·관리자, 조사 업무 담당자, 지자체 담당 공무원 등)를 대상으로 흰개미의 위험성을 인식시키고, 관련 매뉴얼 개발과 정기적인 교육이 필요하다.

목조건축문화재의 흰개미 피해는 기후변화, 외래 흰개미의 유입 등으로 증가할 가능성이 높다. 문화재의 원형 보존을 위해서는 흰개미 피해를 사전에 예방하는 것이 가장 중요하며, 상시 관리·정기 조사·방제 조치 등이 하나

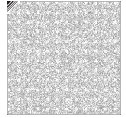


의 체계로 구축되어 원활히 수행될 때 효과적인 예방이
가능하다.*

* 본 논문은 국립문화재연구소 국가연구개발과제 '국보·보물 등 건조물문화재 안전관리 조사연구(과제번호 NRICH-2005-C05F-1)'의 연구 결과물입니다.

참고문헌

- 김길하·김동순·박정규·조수원·윤영남·이경열, 2012, 『삼고 해충학』, 향문사, p.166.
- 김대운·정선혜·이상환·정용재, 2010, 「극초단파를 이용한 흰개미 탐지 기술 적용 연구」, 『보존과학회지』 26(1), (사)한국문화재보존과학회, pp.77~83.
- 김시현·이상빈, 2019, 「외래 흰개미의 유입에 따른 목조문화재의 위협」, 『문화재방재학회 논문집』 4(2), (사)문화재방재학회, pp.139~147.
- 김영희·조창욱·김수지·박지희, 2019, 「국내 목조문화재 생물 피해 현황 및 지역적 특성 비교」, 『제49회 (사)한국문화재보존과학회 춘계학술대회 발표요지집』, (사)한국문화재보존과학회, pp.117~118.
- 김윤수·김규혁·김영숙, 2019, 『목재보존과학』, 전남대학교 출판문화원, p.117.
- 문화재청, 2012, 『문화재 생물피해관리 매뉴얼』, pp.1~117.
- 문화재청, 2019, 「16장 보존 처리 공사」, 『2019 문화재 수리 표준 품셈』, p.346.
- 문화재청, 2020, 「2100 보존 처리 공사」, 『문화재 수리 표준 시방서』, p.390.
- 이규식·정소영·정용재, 2000, 「목조문화재의 원형 보존을 위한 충해 방제 방안」, 『보존과학연구』 21, 국립문화재연구소, pp.5~55.
- 이규식·정소영·정용재, 2001, 「목조건축물의 흰개미 모니터링 및 방제 방법」, 『보존과학연구』 22, 국립문화재연구소, pp.41~52.
- 임익균·정용재, 2019, 「흰개미 가해 목조건축물의 급속 방제를 위한 분말형 약제(Termite Dust) 평가기준 연구」, 『보존과학회지』 35(3), (사)한국문화재보존과학회, pp.227~235.
- 임익균·정선혜·정용재, 2019, 「흰개미 토양 처리제 효과 평가 및 시험 방안 연구」, 『보존과학회지』 35(2), (사)한국문화재보존과학회, pp.177~186.
- 임익균·강원철·차현석·한규성, 2021, 「국내 목조문화재에 대한 지중흰개미 피해 및 모니터링 현황」, 『보존과학회지』 37(3), (사)한국문화재보존과학회, pp.191~208.
- 정소영, 2010, 「탐지견을 활용한 목조건축물의 흰개미 피해 조사 연구」, 『보존과학연구』 31, 국립문화재연구소, pp.121~130.
- 정소영·이규식·정용재, 2002, 「해인사의 흰개미 모니터링 및 방제 방안」, 『보존과학연구』 23, 국립문화재연구소, pp.77~93.
- 한성희·이규식·정용재, 1998, 「한국 서식 흰개미의 특성과 방제」, 『보존과학연구』 19, 국립문화재연구소, pp.145~172.
- Carnohan, L., Lee, S. B., Su, N. Y., 2021, 'Concentration-Dependent Feeding Deterrence to 20-Hydroxyecdysone for Three Subterranean Termite Species (Blattodea: Rhinotermitidae)', *Insects* 12(3), MDPI, pp.218~225.
- Carnohan, L., Su, N. Y., 2018, 'Mortality Time Trends of Three Subterranean termite species when exposed to 20-hydroxyecdysone, alone and in combination with noviflumuron', *Journal of Economic Entomology* 111(5), The Entomological Society of America, pp.2312~2316.
- Chouvinc, T., 2018, 'Comparative impact of chitin synthesis inhibitor baits and non-repellent liquid termiticides on subterranean termite colonies over foraging distances: colony elimination versus localized termite exclusion', *Journal of Economic Entomology* 111(5), The Entomological Society of America, pp.2317~2328.
- Curl, G., 2004, 'Pumped-up termite market', *Pest Control Technology* 32(26), GIE media Inc., pp.28~33.
- Eger, J., Hamm, R. L., Demark, J. J., Chin-Heady, E., Tolley, M. P., Benson, E. P., Zungoli, P., Smith, M. S., Spomer, N., 2014, 'Durability of a novel durable bait for control of subterranean termites (Isoptera: Rhinotermitidae): results of five-year field aging studies', *Journal of Economic Entomology* 107(3), The Entomological Society of America, pp.1201~1205.
- Eger, J., Lees, M. D., Fisher, M. L., Messenger, M. T., Tolley, M. P., 2011, 'Discovery and consumption of a novel durable bait matrix by subterranean termites (Isoptera: Rhinotermitidae)', *Sociobiology* 58(3), Universidade Estadual de Feira de Santana, pp.651~666.

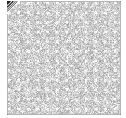


참고문헌

- Esenther, G. R., Gray, D. E., 1968, 'Subterranean termite studies in southern Ontario', *The Canadian Entomologist* 100(8), Entomological Society of Canada, pp.827~834.
- Evans, T. A., Iqbal, N., 2015, 'Termite (order Blattodea, infraorder Isoptera) baiting 20 years after commercial release', *Pest Management Science* 71(7), Society of Chemical Industry, pp.897~906.
- Gautam, B. K., Henderson, G., Davis, R. W., 2012, 'Toxicity and horizontal transfer of 0.5% fipronil dust against Formosan subterranean termites', *Journal of Economic Entomology* 105(5), The Entomological Society of America, pp.1766~1772.
- Gautam, B. K., Henderson, G., 2014, 'Comparative evaluation of three chitin synthesis inhibitor termite baits using multiple bioassay designs', *Sociobiology* 61(1), Universidade Estadual de Feira de Santana, pp.82~87.
- Getty, G. M., Solek, C. W., Sbragia, R. J., Haverty, M. I., Lewis, V. R., 2007, 'Large-scale suppression of a subterranean termite community using the Sentricon Termite Colony Elimination System: a case study in Chatsworth, California, USA', *Sociobiology* 50(3), Universidade Estadual de Feira de Santana, pp.1~10.
- Haagsma, K., 2003, 'Utilization and movement of toxicants and nutrients and their effects on the western subterranean termite, *Reticulitermes hesperus* Banks (Isoptera: Rhinotermitidae)', Ph.D. dissertation, University of California (Riverside).
- Husseneder, C., Grace, J. K., Messenger, M. T., Vargo, E. L., Su, N. Y., 2003, 'Describing the spatial and social organization of Formosan subterranean termite colonies in Armstrong Park, New Orleans', *Sociobiology* 41(1), Universidade Estadual de Feira de Santana, pp.61~65.
- Kakkar G., Chouvinc, T., Osbrink, W., Su, N. Y., 2016, 'Temporal assessment of molting in workers of Formosan subterranean termites (Isoptera: Rhinotermitidae)', *Journal of Economic Entomology* 109(5), The Entomological Society of America, pp.2175~2181.
- Kofoid, C. A., Termite Investigation Committee, 1934, *Termites and Termite Control*, University of California Press.
- Kogan, M., 1998, 'Integrated pest management: historical perspectives and contemporary developments', *Annual Review of Entomology* 43(1), pp.243~270.
- Krishna, K., Grimaldi, D. A., Krishna, V., Engel, M. S., 2013, 'Treatise on the Isoptera of the World', *Bulletin of the American Museum of Natural History*, pp.147~182.
- La Fage, J. P., 1986, 'Subterranean termites: a personal perspective', *In Proceedings of the National Conference on Urban Entomology*, Texas A&M University, pp.45~57.
- La Fage, J. P., William L. Nutting, and Michael I. Haverty, 1973, 'Desert subterranean termites: a method for studying foraging behavior', *Environmental Entomology* 2.5, pp.954~956.
- Lai, P. Y., 1977, 'Biology and ecology of the Formosan subterranean termite, *Coptotermes formosanus*, and its susceptibility to the entomogenous fungi, *Beauveria bassiana* and *Metarrhizium anisopliae*', Ph.D. Dissertation, University of Hawaii (Honolulu), p.140.
- Lee, S. B., Tong, R. L., Kim, S. H., Im, I. G., Su, N. Y., 2021, 'Potential pest status of the Formosan subterranean termite, *Coptotermes formosanus* Shiraki (Blattodea: Isoptera: Rhinotermitidae), in response to climate change in the Korean peninsula', *Floridan Entomologist* 103(4), Florida Entomological Society, pp.431~437.
- Lee, W. H., Choi, D. S., Ji, J. Y., Kim, N. H., Han, J. M., Park, S. H., Lee, S. J., Seo, M. S., Hwang, W. J., Forschler, B. T., Takematsu, Y., Lee, Y. H., 2015, 'A new record of *Reticulitermes kanmonensis* Takematsu, 1999 (Isoptera: Rhinotermitidae) from Korea', *Journal of Asia-Pacific Entomology* 18(3), Korean Society of Applied Entomology, pp.351~359.

참고문헌

- Li, Q., Zhu, Q., Fu, S., Zhang, D., Huang, J., Yuan, J., 2016, 'Efficacy of 1% fipronil dust of activated carbon against subterranean termite *Coptotermes formosanus* Shiraki in laboratory conditions', *Sociobiology* 63(4), Universidade Estadual de Feira de Santana, pp.1046~1050.
- Messenger, M. T., Su, N. Y., Husseneder, C., Grace, J. K., 2005, 'Elimination and reinvasion studies with *Coptotermes formosanus* (Isoptera: Rhinotermitidae) in Louisiana', *Journal of Economic Entomology* 98(3), The Entomological Society of America, pp.916~929.
- Mullins, A. J., Su, N. Y., Owens, C., 2011, 'Reinvasion and colony expansion of *Coptotermes formosanus* (Isoptera: Rhinotermitidae) after areawide elimination', *Journal of Economic Entomology* 104(5), The Entomological Society of America, pp.1687~1697.
- Ostaff, D., Gray, D. E., 1975, 'Termite (Isoptera) suppression with toxic baits', *The Canadian Entomologist* 107(12), Entomological Society of Canada, pp.1321~1325.
- Paysen, E. S., Zungoli, P. A., Benson, E. P., Demark, J. J., 2001, 'Impact of Auxiliary Stations in a Baiting Program for Subterranean Termites (Isoptera: Rhinotermitidae)', *Florida Entomologist* 87(4), Florida Entomological Society, pp.623~624.
- Park, H. J., Bae, C. H., Lee, J. J., Shin, T. S., Park, H. C., 2013, 'A comparative phylogenetic analysis of *Reticulitermes speratus kyushuensis* (Isoptera: Rhinotermitidae) on Jeju island, Korea', *Journal of Agriculture & Life Science* 47(1), Institute of Agriculture & Life Science, Gyeongsang National University, pp.137~146.
- Potter, M. H., Hillery, A. E., 2002, 'Exterior-targeted liquid termiticides: an alternative approach to managing subterranean termites (Isoptera: Rhinotermitidae) in buildings', *Sociobiology* 39(3), Universidade Estadual de Feira de Santana, pp.373~405.
- Randall, M., Doody, T. C., 1934, 'Poison dusts. I. Treatments with poisonous dusts', *Termites and Termite Control*, University of California Press, pp.463~476.
- Rust, M. K., Su, N. Y., 2012, 'Managing social insects of urban importance', *Annual Review of Entomology* 57(1), pp.355~375.
- Saran, R. K., Rust, M. K., 2007, 'Toxicity, uptake, and transfer efficiency of fipronil in western subterranean termite (Isoptera: Rhinotermitidae)', *Journal of Economic Entomology* 100(2), The Entomological Society of America, pp.495~508.
- Smith, J., Su, N. Y., Escoba, R., 2006, 'An area-wide population management project for the invasive eastern subterranean termite (Isoptera: Rhinotermitidae) in a low-income community in Santiago, Chile', *American Entomologist* 52(4), Entomological Society of America, pp.253~260.
- Son, S. Y., Lee, H. B., Lee, W. H., 2019, 'A new record of *Reticulitermes speratus speratus*(Kolbe) (Isoptera: Rhinotermitidae) from Korea', *2019 Fall conference of Korean Society of Applied Entomology*, Korean Society of Applied Entomology, p.45.
- Su, N. Y., 1994, 'Field evaluation of a hexaflumuron bait for population suppression of subterranean termites (Isoptera: Rhinotermitidae)', *Journal of Economic Entomology* 87(2), The Entomological Society of America, pp.389~397.
- Su, N. Y., 2001, 'A computerized system for remote monitoring of subterranean termites near structures', *Journal of Economic Entomology* 94(6), The Entomological Society of America, pp.1518~1525.
- Su, N. Y., 2002, 'Dimensionally stable sensors for a continuous monitoring program to detect subterranean termite (Isoptera: Rhinotermitidae) activity', *Journal of Economic Entomology* 95(5), The Entomological Society of America, pp.975~980.

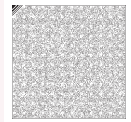


참고문헌

- Su, N. Y., 2007, 'Hermetically sealed baits for subterranean termites (Isoptera: Rhinotermitidae)', *Journal of Economic Entomology* 100(2), The Entomological Society of America, pp.475~482.
- Su, N. Y., 2015, 'A fluid bait for remedial control of subterranean termites', *Journal of Economic Entomology* 108(1), The Entomological Society of America, pp.274~276.
- Su, N. Y., 2019, 'Development of baits for population management of subterranean termites', *Annual Review of Entomology* 64, pp.115~130.
- Su, N. Y., Ban, P. M., Scheffrahn, R. H., 1997, 'Remedial baiting with hexaflumuron in above-ground stations to control structure-infesting populations of the Formosan subterranean termite (Isoptera: Rhinotermitidae)', *Journal of Economic Entomology* 90(3), The Entomological Society of America, pp.809~817.
- Su, N. Y., Ban, P. M., Scheffrahn, R. H., 2001, 'Control of subterranean termites (Isoptera: Rhinotermitidae) using commercial prototype aboveground stations and hexaflumuron baits', *Sociobiology* 37(1), Universidade Estadual de Feira de Santana, pp.111~120.
- Su, N. Y., Guidry, E., Cotonne, C., 2016a, 'Sustainable management of subterranean termite populations (Isoptera: Rhinotermitidae) in Armstrong Park, New Orleans, with durable baits', *Journal of Economic Entomology* 109(3), The Entomological Society of America, pp.1326~1332.
- Su, N. Y., Guidry, E., Mullins, A. J., Cotonne, C., 2016b, 'Reinvasion dynamics of subterranean termites (Isoptera: Rhinotermitidae) following the elimination of all detectable colonies in a large area', *Journal of Economic Entomology* 109(2), The Entomological Society of America, pp.809~814.
- Su, N. Y., Monteagudo, E. J., 2017, 'Hyperrecidivism in the Formosan subterranean termite and eastern subterranean termite (Isoptera: Rhinotermitidae)', *Journal of Economic Entomology* 110(4), The Entomological Society of America, pp.1736~1739.
- Su, N. Y., Scheffrahn, R. H., 1988a, 'Toxicity and lethal time of N-ethyl perfluorooctane sulfonamide against two subterranean termite species (Isoptera: Rhinotermitidae)', *Florida Entomologist* 71(1), Florida Entomological Society, pp.73~78.
- Su, N. Y., Monteagudo, E. J., 1988b, 'Toxicity and feeding deterrence of a dihaloalkyl arylsulfone biocide, A9248, against the Formosan subterranean termite (Isoptera: Rhinotermitidae)', *Journal of Economic Entomology* 81(3), The Entomological Society of America, pp.850~854.
- Su, N. Y., Monteagudo, E. J., 1993, 'Laboratory evaluation of two chitin synthesis inhibitors, hexaflumuron and diflubenzuron, as bait toxicants against Formosan and eastern subterranean termites (Isoptera: Rhinotermitidae)', *Journal of Economic Entomology* 86(5), The Entomological Society of America, pp.1453~1457.
- Su, N. Y., Monteagudo, E. J., 1998, 'A review of subterranean termite control practices and prospects for integrated pest management programmes', *Integrated Pest Management Reviews* 3(1), Springer, pp.1~13.
- Su, N. Y., Scheffrahn, R. H., Ban, P. M., 1995, 'Effects of sulfluramid-treated bait blocks on field colonies of the Formosan subterranean termite (Isoptera: Rhinotermitidae)', *Journal of Economic Entomology* 88(5), The Entomological Society of America, pp.1343~1348.
- Su, N. Y., Tamashiro, M., Haverty, M. I., 1987, 'Characterization of slow-acting insecticides for remedial control of the Formosan subterranean termite (Isoptera: Rhinotermitidae)', *Journal of Economic Entomology* 80(1), The Entomological Society of America, pp.1~4.
- Su, N. Y., Yokum, B., Mullins, A., Bordes, E., Cottone, C., Riegel, C., 2018, 'Field Evaluations of Fluid Baits against Colonies of the Formosan Subterranean Termite (Blattodea: Rhinotermitidae)', *Journal of Economic Entomology* 111(4), The Entomological Society of America, pp.1806~1812.

참고문헌

- Tamashiro, M., Fujii, J., Lai, P-Y., 1973, 'A simple method to observe, trap, and prepare large numbers of subterranean termites for laboratory and field experiments', *Environmental Entomology* 2(4), Oxford Academy, pp.721~722.
- Vargo, E. L., Parman, V., 2012, 'Effect of fipronil on subterranean termite colonies (Isoptera: Rhinotermitidae) in the field', *Journal of Economic Entomology* 105(2), The Entomological Society of America, pp.523~532.
- Yates, J. I., Grace, J. K., 2000, 'Effective Use of Above-Ground Hexaflumuron Bait Stations for Formosan Subterranean Termite Control (Isoptera: Rhinotermitidae)', *Sociobiology* 35(3), Universidade Estadual de Feira de Santana, pp.333~356.



A History of Termite Control and Improvements to Prevent Termites in Wooden Architectural Heritage

LEE Sangbin Postdoctoral Researcher, Entomology and Nematology Department, University of Florida

IM Ikgyun Ph.D. student, Dept. of Cultural Heritage Science, Chungbuk National University

KIM Sihyun* Researcher, Research Division of Safety and Disaster Prevention, National Research Institute of Cultural Heritage

*Corresponding Author : shkim1242@korea.kr

Abstract

Termites are important decomposers in the ecosystem. They are also economically significant structural pests. In this study, we reviewed the developments of termite control and recent research on termite management to provide information on the prevention and control of termites. In Korea, most of the damage to wooden historical buildings is caused by subterranean termites. *Reticulitermes speratus kyushuensis* is the main species, which is widely found throughout the country. In the early 1900s, inorganic insecticides, such as arsenic dust, were used for termite control. After the synthesis of chlorinated hydrocarbon pesticide in the 1940s, it was widely utilized and demonstrated high termite control efficacy. However, chlorinated hydrocarbon insecticides were later banned, disappearing from markets after reports emerged concerning environmental contamination and toxicity to humans. Therefore, the termite control industry sought a new termiticide; hence many pesticides were utilized for termite control. Organophosphate (1960s), carbamate (1970s), pyrethroid, and insect growth inhibitor (1980s) were newly synthesized and adopted. In the 1990s, the first commercial baits using chitin synthesis inhibitors (CSI) were developed, providing a means to eliminate an entire colony of subterranean termites around a structure. Many studies have been carried out on soil termiticides (liquid termiticides) and CSI baits to increase their efficacy, and different baits such as aboveground bait stations, fluid bait, and high-durability bait were also developed in the 2000s. In addition, the paradigm of termite control has shifted from localized treatments using soil termiticides to area-wide pest management using CSI baits to create termite-free zones and protect buildings over time. Termite infestations in wooden historical buildings in Korea have been reported since 1980, and considerable attention was drawn in the 1990s when several UNESCO world heritages such as the Jongmyo Shrine and the Janggyeong Panjeon Depositories of Haeinsa Temple were infested by subterranean termites. Since then, a survey of termite infestation in wooden architectural heritage has been conducted, and the National Research Institute of Cultural Heritage and Heritage Care Program regularly monitors those properties. Finally, we suggest termite management using primarily CSI baits, selective application of various soil treatments applied to the object, foundation soil treatment, research and development of durable termite baits, application of area-wide programs for wooden-building complexes, application of integrated termite management (ITM), and regular education for owners and managers to prevent and reduce termite damage.

Keywords wooden architectural heritage, termites, bait, integrated termite management, area-wide management

Received 2021. 03. 30. • Revised 2021. 04. 21. • Accepted 2021. 04. 29.

