

국내 지중흰개미의 목조건축물 유입 차단을 위한 모래의 적정 입도 연구

A Study on the Particle Size of Sand to Prevent Penetration of Subterranean Termite (*Reticulitermes speratus kyushuensis*) in Wooden Buildings

김시현¹, 김태현², 정용재^{2,*}

¹국립문화재연구원 안전방재연구실

²한국전통문화대학교 문화유산전문대학원 문화재수리기술편과

Si Hyun Kim¹, Tae Heon Kim², Yong Jae Chung^{2,*}

¹Safety and Disaster Prevention Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon 34122, Korea

²Department of Heritage Conservation and Restoration, Graduate School of Cultural Heritage, Korea National University of Cultural Heritage, Buyeo 33115, Korea

Received October 16, 2021
Revised November 9, 2021
Accepted November 16, 2021

*Corresponding author

E-mail: iamchung@nuch.ac.kr
Phone: +82-41-830-7365

Journal of Conservation Science
2022;38(2):80-86

<https://doi.org/10.12654/JCS.2022.38.2.01>

pISSN: 1225-5459, eISSN: 2287-9781

© The Korean Society of Conservation Science for Cultural Heritage

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록 흰개미는 목조건축문화재의 주요 손상 원인 중 하나이며, 방제를 위해 살충제가 주로 사용되어 왔다. 흰개미 피해가 심한 국가들은 화학적 방제법의 대안으로 흰개미가 통과하지 못하는 망, 입자 등을 이용한 물리적 방어벽이 사용되고 있다. 본 연구에서는 물리적 방어벽의 적용을 위해 국내 전역에 서식하는 *R. speratus kyushuensis*의 유입을 차단하는 모래의 적정 입도 범위를 규명하고자 하였다. 0.85~4.00 mm의 입도별 모래로 흰개미 유입 차단성을 평가한 결과 1.00~2.80 mm 입도 조건에서 흰개미의 유입을 효과적으로 차단하였다. 이보다 작은 입도 조건에서는 흰개미들이 모래 입자를 옮겨서 선형에 가까운 흰개미 길(mud tube)을 구축하여 모래층을 관통하였으며, 이보다 큰 입도 조건에서는 흰개미들이 모래 사이의 공극을 지나다니는 방법으로 모래층을 관통하는 양상이 확인되었다.

중심어 흰개미, 목조건축문화재, 물리적 방어벽, *Reticulitermes speratus kyushuensis*, 입도, 터널링

ABSTRACT Termites cause massive damage to wooden architectural heritage structures. Chemical treatments have been commonly used to control them. In foreign countries, physical barriers made of sheet and particles impenetrable to termite are being used as an alternative to the chemical method. To study the efficacy of physical barriers, we investigated the appropriate sand particle size that can prevent the penetration of *R. speratus kyushuensis*. Upon evaluating the barrier properties of sand with particle sizes ranging from 0.85 to 4.00 mm, the penetration of termites was found to be effectively blocked at a particle size range of 1.00 to 2.80 mm. At smaller particle sizes, termites managed to move the sand particles and build an almost linear mud tube to penetrate the sand layer. At larger particle sizes, the termites could penetrate the sand layer by passing through the sand gaps.

Key Words Termite, Wooden architectural heritage, Physical barrier, *Reticulitermes speratus kyushuensis*, Particle size, Tunneling

1. 서론

흰개미는 개미, 벌과 같은 진사회성 곤충(eusocial insect)의 일종이며 전 세계적으로 3,106종이 분포한다(Krishna *et al.*, 2013). 흰개미는 목재, 낙엽, 농작물 등 모든 종류의 식물성 재료를 체내 공생자(symbiont) 또는 효소를 이용하여 분해하고 영양원으로 사용한다. 따라서 산림생태계의 분해자로 생태적으로는 중요한 역할을 담당하지만, 목조건

축물이나 농작물 등을 손상시켜 많은 경제적 피해를 입힌다.

약 80여 종의 흰개미가 경제적으로 심각한 피해를 입히는 종으로 간주되는데, 2010년에만 전 세계적으로 400억 달러의 경제적 손실을 입혔고, 피해의 약 80%는 지중 흰개미(subterranean termite)에 의해 발생하였다(Rust and Su, 2012). 흰개미 피해의 대부분이 지중흰개미로 인해 발생하기 때문에, 흰개미 방제법은 주로 보호하고자 하는 목조건축물 하부나 주변에 살충제(termiticide) 또는 균체

제거제(bait)를 사용하여 지중흰개미의 유입을 차단하는 화학적 방어벽(chemical barrier)을 조성하는 방식으로 전개되어 왔다. 약제를 이용한 방제법들은 흰개미 개체나 군체를 직접 제거한다는 장점이 있지만, 인축에 유독한 약제를 사용하며 주기적인 재처리가 필요한 단점이 있다.

이에 미국, 호주, 일본 등 지중흰개미 피해가 심한 곳에서는 친환경 흰개미 방제법의 일종으로 물리적 방어벽(physical barrier)이 사용되고 있다. 물리적 방어벽은 흰개미가 통과할 수 없는 망(sheet)이나 입자(particle)를 건물 기단 상면이나 기단 외곽에 조성하여 지중흰개미가 목조건축물로 유입되지 않게 하는 방법이다. 설치 후 장기간 효력이 유지되며 친환경적인 장점이 있다(Verma *et al.*, 2009).

물리적 방어벽은 흰개미 종마다 적합한 적용 조건이 다르므로, 그동안 외국에서는 주요 지중흰개미 종을 대상으로 유입을 차단할 수 있는 입자의 크기, 종류 등에 대해 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 1957년 적정 입도의 모래를 사용하여 지중흰개미의 침입을 막을 수 있다는 연구 결과가 최초로 보고되었으며(Ebleing and Pence, 1957) 모래(Smith and Rust, 1990; Su *et al.*, 1991; Su and Scheffrahn, 1992; Myles, 1997)와 현무암(Tamashiro and Yates, 1987; Tamashiro *et al.*, 1991; Yates *et al.*, 2000; Yates *et al.*, 2002), 골재(Keefer *et al.*, 2013), 화산쇄설물(Acda and Ong, 2005) 등 다양한 재료들이 여러 지중흰개미 종을 대상으로 평가되었으며, 이 결과들에 근거하여 제품들이 상용화되기도 하였다.

반면 국내에서는 물리적 방어벽과 관련된 연구가 수행되지 않다가 최근 외국 사례를 참조하여 목조건축물의 흰개미 피해를 막기 위해 물리적 방어벽의 적용을 제안한 연구(Gu and Cheon, 2018)와 망 형태(sheet type)의 물리적 방어벽 적용을 위해 흰개미(*R. speratus kyushuensis*)의 최소 통과 직경을 평가한 연구(Kim *et al.*, 2020)가 수행되었으나 아직 입자 형태(particle type)의 물리적 방어벽 적용을 위한 연구는 수행된 바 없다. 이에 본 연구에서는 건축 또는 문화재 시공 현장 등에서 가장 쉽게 구할 수 있는 모래를 재료로 국내 우점 흰개미인 흰개미(*R. speratus kyushuensis*)의 침투를 막

을 수 있는 최적의 입도 조건을 규명하고자 수행되었다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구재료

2.1.1. 모래

본 연구에서 사용된 모래의 입도 조건은 *Coptotermes*와 *Reticulitermes* 속(屬) 지중흰개미에 대한 선행 연구(Ebeling and Pence, 1957; Smith and Rust, 1990; Su *et al.*, 1991; Myles, 1997)를 참조하여 0.85-4.00 mm까지 총 9가지 조건(0.85-1.00 mm, 1.00-1.18 mm, 1.18-1.40 mm, 1.40-1.70 mm, 1.70-2.00 mm, 2.00-2.36 mm, 2.36-2.80 mm, 2.80-3.35 mm, 3.35-4.00 mm)을 적용하였다. 해사(sea sand, Wako Co., JPN)를 Tyler screen scale에 따른 표준체(청계상공사, KOR)로 입도별 분리한 뒤 가압멸균기(Maxterile 60, 대한 과학, KOR)로 121°C에서 15분간 가압멸균(15lb psi) 뒤 건조하여 실험에 사용하였다.

2.1.2. 공시충

공시충은 충남 부여군 규암면 일대의 야산(N36°18'31", E126°53'49")에서 총 3개의 흰개미 군체를 채집하여 사용하였다. 흰개미 군체가 서식 중인 목재를 채집하여 대형 플라스틱 용기에 원예용 배양토와 함께 두고 주기적으로 증류수를 분무하여 보관하다가 평가 전 해체하여 공시충을 분리하였다. 세 군체 모두 병정개미를 분리하여 현미경(SMZ18, Nikon, JPN)으로 형태적 특징을 관찰하였으며 그 결과 두부(head capsule)의 형태, 상순(labrum)과 전흉배판(pronotum)의 강모 등을 통해 흰개미(*R. speratus kyushuensis*)임이 확인되었다(Figure 1).

2.1.3. 시험 용기

시험에 사용된 용기는 좌·우의 원통형 용기(직경 50 mm, 높이 120 mm)와 이를 연결하는 통로(직경 20 mm, 길이 30 mm)로 구성된 U자형 투명 유리 용기이다(Figure 2A).



Figure 1. Morphological characteristics of test termite (left: head capsule, middle: labrum, right: pronotum).

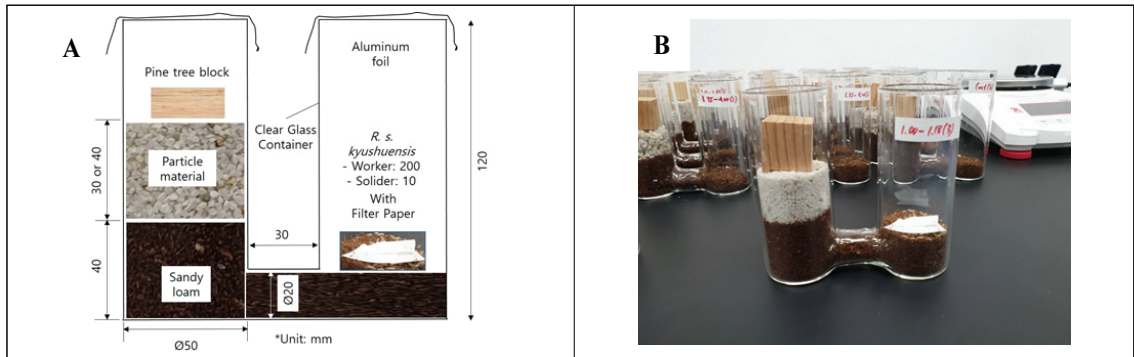


Figure 2. Penetration method (2A) and apparatus (2B).

2.2. 연구 방법

2.2.1. 평가 방법

평가 방법은 일본목재보존협회(Japan Wood Protection Association)의 표준시험법 중 ‘입자에 의한 물리적 환경 미 유입 방지층(입자 물리 배리어)의 관통 저지 효력 성능 기준 및 그 시험 방법(粒子による物理的防蟻層(粒子物理バリア)の貫通阻止効力性能基準及びその試験方法, JWPAS-TS-2, 2018)’을 일부 수정하여 실시하였다.

시험 용기의 좌측(이하 시험실)에는 사양토(sandy loam)에 증류수를 4:1(w/w)로 혼합하여 40 mm 높이까지 채우고, 그 위에 입도별 모래를 30 mm 쌓아 입자층을 만들었다. 입자층 상부에 30 × 30 × 30 mm 크기의 소나무(*Pinus densiflora*) 시험편을 두어 공시층이 입자층을 관통하여 목재 시험편을 섭식하는지 확인하였다. 시험 용기의 연결부와 우측(이하 배양실)에는 사양토에 증류수를 4:1(w/w)로 혼합하여 높이 20 mm까지 채웠다. 대조군은 시험실에 입자층 없이 사양토만 70 mm 높이까지 채운 뒤 시험군과 동일하게 목재 시험편을 두었다(Figure 2A, 2B).

각 시험군의 배양실에 공시층(일개미 200마리와 병정개미 10마리)과 먹이용 정량여과지(Advantec Co., JPN)를 투입하고 시험용기 상부를 알루미늄 호일로 밀폐한 뒤 20-25°C가 유지되는 실험실에서 8주간 배양하였다. 배양 종료 후 육안관찰 및 사진촬영을 통해 목재 시험편의 가

해 여부, 모래 입자층의 관통 여부 및 관통 높이를 확인하였으며 실험은 각 조건별 3배수로 실시되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 흰개미 침입을 방지하는 최적의 입도 조건

8주간 입도별 관통실험 결과 모든 입도 조건에서 공시층이 생존하였으며 대조군은 목재시험편이 가해되어 표준시험법의 시험 요건을 만족하였다. 평가 결과는 공시층이 입자층을 완전히 관통하여 목재시험편을 가해한 경우, 공시층이 입자층 일부만을 관통하여 목재시험편까지는 도달하지 못한 경우, 공시층이 입자층을 전혀 관통하지 못한 경우의 3가지 유형으로 나타났다.

입도별로 살펴보면 0.85-1.00 mm 조건에서는 세 실험군 모두 공시층들이 입자층을 완전히 관통하여 입자층 상부의 목재시험편 하부를 가해하였다(Table 1). 반면에 1.00 mm부터 2.80 mm까지의 입도 조건에서는 공시층이 입자층을 전혀 관통하지 못하였다(Table 1). 2.80-3.35 mm 조건에서는 세 실험군 중 한 실험군에서는 입자층을 완전히 관통하여 상부의 목재시험편까지 도달하였으나 나머지 두 실험군은 30 mm의 입자층 중 약 20 mm 높이까지 관통하였으며 목재시험편에는 도달하지 못하였다(Table 1). 3.35-4.00 mm 조건에서는 세 실험군 모두 입자층을 부분

Table 1. Penetration length of termites by particle size (unit: mm)

Particle size	0.85-1.00	1.00-1.18	1.18-1.40	1.40-1.70	1.70-2.00	2.00-2.36	2.36-2.80	2.80-3.35	3.35-4.00	Control
Penetration length (M±SD)	30	-	-	-	-	-	-	23.3 ±4.7	13.3 ±2.4	30
Damage of woodblock*	O	X	X	X	X	X	X	△	X	O

* O: damaged, △: partially damaged, X: non damaged.

Table 2. Effective sand particle size against subterranean termites

Species	Effective particle size (mm)	Reference
<i>Reticulitermes hesperus</i>	1.2-2.7	Ebeling and Pence, 1957
<i>Reticulitermes hesperus</i>	0.85-2.36	Smith and Rust, 1990
<i>Coptotermes formosanus</i>	1.7-2.36	Su <i>et al.</i> , 1991
<i>Reticulitermes flavipes</i>	1.00-2.36	Su <i>et al.</i> , 1991
<i>Reticulitermes flavipes</i>	1.4-2.8	Myles, 1997

적으로 관통하였으며 목재시험편에는 도달하지 못하였다(Table 1). 따라서 흰개미(*R. speratus kyushuensis*)의 침입을 효과적으로 차단할 수 있는 모래의 입도 조건은 1.00-2.80 mm인 것으로 나타났다.

흰개미들은 입도가 작아 입으로 옮길 수 있는 모래들은 이동시켜 흰개미 길을 형성하며, 입도가 커서 그 공극 사이로 지나다닐 수 있는 정도라면 입자 사이의 공극을 통과한다. 따라서 턱(mandible)이 커면 상대적으로 더 큰 모래도 입으로 옮길 수 있고, 머리의 폭(head width)이 더 작다면 상대적으로 더 작은 모래 사이도 지나다닐 수 있으므로 흰개미 종, 개체의 발달 정도에 따라 옮기거나 지나다닐 수 있는 모래의 최적 입도가 각기 다르게 나타난다(Su *et al.*, 1991). 여러 지중흰개미 종을 대상으로 입도별 모래의 유입 차단 효율을 평가한 결과는 Table 2와 같다. 동일한 종이라도 실험 결과가 약간씩 차이가 있는데, 공시충의 발달 단계에 따라 몸 크기가 다를 수 있으며 모래의 입도 외에도 입자가 구형에 가까운지나 조도(粗度, roughness) 또한 영향을 미치기 때문이다(Yanase *et al.*, 2005; Keefer *et al.*, 2013). 선행 연구들의 결과와 흰개미(*R. speratus kyushuensis*)의 평가 결과를 비교해 볼 때, *Reticulitermes* 속에 속한 다른 2종(*R. hesperus*, *R. flavipes*)과 유사한 결과가 나타났으며, *C. formosanus*에 비해서는 효과적인 입도 범위가 더 넓은 것을 알 수 있다(Table 2).

3.2. 입도별 굴파기(tunneling) 양상 비교

입도 조건별로 공시충들이 터널링을 통해 흰개미 길(mud tube)을 형성하는 양상이 다르게 나타났다. 침입을 막을 수 있는 최적 입도 조건인 1.00-2.80 mm보다 작은 입도 조건(0.85-1.00 mm)에서는 공시충들이 입자층을 매우 효과적으로 터널링하여 선형에 가까운 흰개미 길이 형성되었다(Figure 3A, 3B). 반면에 최적 입도 조건보다 큰 입도 조건(2.80-4.00 mm)에서는 공시충들이 모래 입자 사이를 지나다니며 비선형적인 흰개미 길을 형성한 것이 확인되었다(Figure 4A, 4B).

흰개미들은 어디에 먹이가 있는지 알지 못할 때는 여러 방향으로 탐색하며 먹이를 찾고, 먹이원의 위치를 특정한 이후로는 기존에 형성된 여러 경로 중 가장 가까운 곳을 이용하거나 새로 만들어 에너지를 효율적으로 사용한다(Lee and Su, 2010). 앞서 언급한 것처럼 입도가 작은 경우에는 흰개미들이 모래를 직접 옮길 수 있으므로 여러 흰개미 길을 만드는 과정에서 선형에 가까운 에너지 효율적 경로가 형성된 것으로 보인다. 반대로 입도가 큰 경우에는 흰개미들이 모래를 옮길 수 없으므로 입자 사이를 지나다니는 비효율적인 경로가 유지되어 위 결과와 같은 양상이 나타난 것으로 보인다.

흰개미가 관통하지 못하는 1.00-2.80 mm 입도 조건에

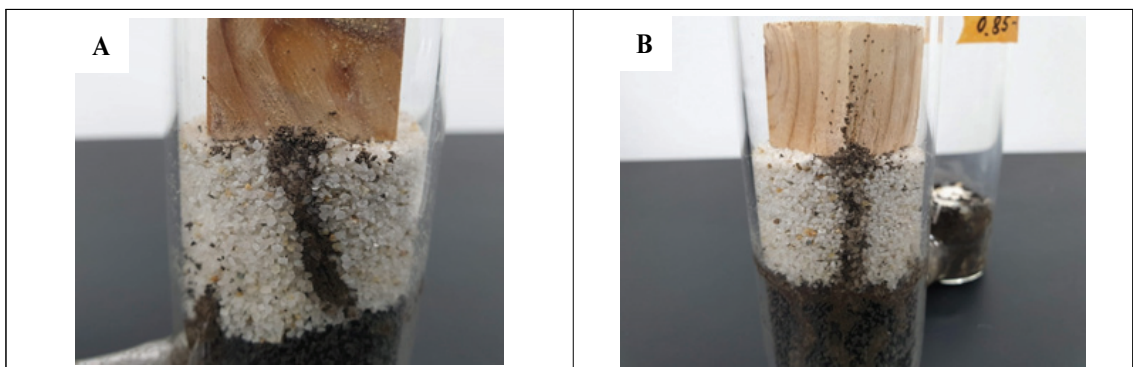


Figure 3. Penetration of sand layer using mud tube (A, B) (particle size: 0.85-1.00 mm).

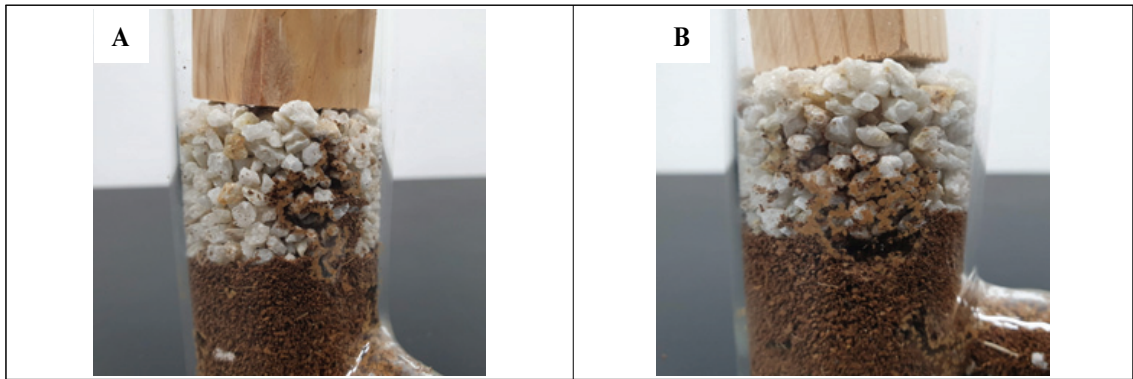


Figure 4. Curved mud tube between sand particles (A, B) (particle size: 2.80-3.35 mm).

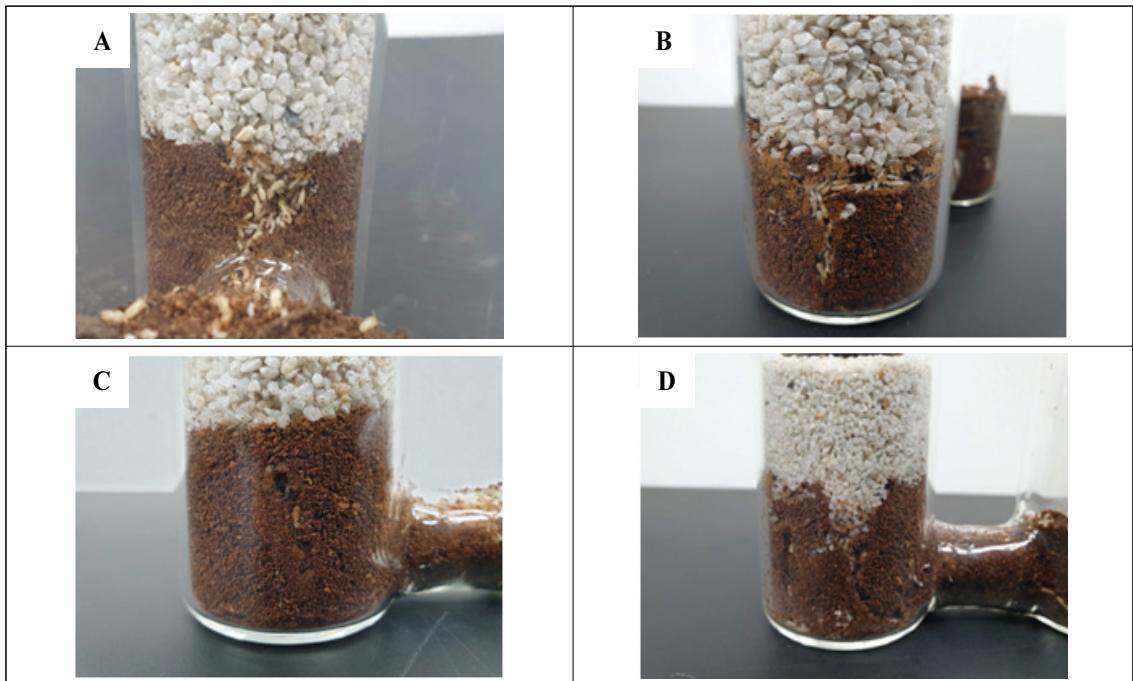


Figure 5. Tunneling under sand layer (A, B) (particle size: 1.70-2.00 mm (A), 2.00-2.36 mm (B)), dropped sand (C, D) (particle size: 1.70-2.00 mm).

서는 입자층 하부를 수평·수직 방향으로 파내려가다가 (Figure 5A, 5B) 공동의 크기가 일정 규모 이상이 되면 상부 하중으로 인해 모래 입자 일부가 떨어져 빈 공간을 채우는 모습이 공통적으로 확인되었다(Figure 5C, 5D). 본 실험에서는 입자층의 두께가 충분히 두꺼우므로 하부의 모래 일부가 떨어져 내려와도 상부의 모래들이 빈 공간을 다시 채워 흰개미들이 관통하지 못하였다. 그러나 야외 현장에서 적용 시 초기에 설치한 입자층이 흰개미 침입을 막는 효력이 있더라도 입자층 하부의 지반 일부가 침하된다면 부분적으로 입자층이 붕괴될 수 있다. 이 부위를 통

해 흰개미들이 유입될 수 있을 것으로 추정되며 이는 흰개미(*R. speratus*)를 대상으로 한 선행연구에서도 확인된 바 있다(Yanase *et al.*, 2019). 이 문제를 방지하기 위해 하와이에서는 파쇄된 현무암을 현장에 시공할 때 입자층의 두께를 4인치 이상으로 시공하도록 제안하였다(Yates *et al.*, 2000; 2002). 향후 국내의 목조건축, 문화재 현장에 입자형 물리적 방어벽을 시공하고자 할 때에는 지반과 상부 하중 등을 고려하여 입자층이 침하되지 않도록 설치하고, 부분적인 침하가 발생하여도 효력을 유지할 수 있도록 일정 두께 이상으로 시공해야 할 것으로 보인다.

4. 결론

흰개미로 인한 목조건축물 피해는 전 세계적으로 나타나고 있으며, 우리나라에서도 상당수의 목조건축물문화재에서 흰개미 피해가 확인되었다. 흰개미 방제는 주로 토양처리제, 균체제거제 등 화학적 방제법이 주로 사용되어 왔지만, 주변 환경에 대한 악영향과 주기적인 재처리 등의 문제가 나타나고 있다. 본 연구에서는 화학적 방제법의 대안으로 국외에서 사용되고 있는 물리적 방어벽을 국내에 적용하기 위한 기초 연구로서, 국내 우점 흰개미인 흰개미(*R. speratus kyushuensis*)의 침입을 막을 수 있는 효과적인 모래 입도 범위를 평가하였다.

0.85 mm부터 4.00 mm까지 총 9가지 입도 조건을 적용하여 평가를 실시한 결과 1.00-2.80 mm의 입도 범위에서 공시충들이 모래 입자층을 통과하지 못하여 이 범위가 지층에서의 흰개미 유입을 차단할 수 있는 효과적인 조건임을 확인할 수 있었다. 이보다 작은 0.85-1.00 mm 입도 조건에서는 공시충들이 입자층을 완전히 관통하며 선형에 가까운 흰개미 길을 조성하였다. 또한 적정 범위보다 큰 2.80-4.00 mm의 입도 조건에서는 공시충들이 모래 입자 사이를 지나다니며 비정형적인 흰개미 길을 조성하였으며, 일부 시험군만이 입자층을 완전히 관통하는 양상이 나타났다.

본 연구와 선행연구를 통해 흰개미(*R. speratus kyushuensis*)의 유입 차단을 위한 입자형·망형 물리적 방어벽의 적용 조건이 규명되었다. 물리적 방어벽은 이미 건립된 건물에는 적용이 어렵지만 목조건축물의 해체보수 또는 신축 시에 적용이 가능하다. 다만 목조건축물마다 기초, 지정, 기단 높이 등이 각기 다르므로, 추후 현장에서 발생할 수 있는 문제점을 파악하고 적절한 시공 방법을 마련하기 위해 폭넓은 현장 적용성 평가가 필요하다.

사 사

이 연구는 국립문화재연구원 안전방재연구실의 ‘건조물 문화재 안전관리 조사연구(과제번호: NRICH-2205-D12F-1)’ 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Acda, M.N. and Ong, H.B., 2005, Penetration of lahar aggregates by Philippine subterranean termites (Isoptera: Termitidae). *Sociobiology*, 47(1), 189-200.

Ebleing, W. and Pence R.J., 1957, Relation of particle size

to the penetration of subterranean termites through barriers of sand or cinders. *Journal of Economic Entomology*, 50(5), 690-692.

Gu, D. and Cheon, D., 2018, Consideration of the termite control method of wooden building. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 34(8), 129-136. (in Korean with English abstract)

Keefer, T.C., Zollinger, D.G. and Gold, R.E., 2013, Evaluation of aggregate particles as a physical barrier to prevent subterranean termite incursion into structures. *Southwestern Entomologist*, 38(3), 447-464.

Kim, S., Lee, S. and Lim, I., 2020, Study of minimum passage size of subterranean termites (*Reticulitermes speratus kyushuensis*). *MUNHWAJAE, Korean Journal of Cultural Heritage Studies*, 53(4), 188-197. (in Korean with English abstract)

Krishna, K., Grimaldi, D.A., Krishna, V. and Engel, M.S., 2013, Treatise on the isoptera of the world. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, New York, 1, 171.

Lee, S. and Su, N.Y., 2010, Simulation study on the tunnel networks of subterranean termites and the foraging behavior. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 13, 83-90.

Myles, T.G., 1997, Comparison of the penetrability of smooth and crushed sand by subterranean termites (Isoptera: Rhinotermitidae). *Sociobiology*, 30(3), 295-303.

Rust, M.K. and Su, N.Y., 2012, Managing social insects of urban importance. *Annual Review of Entomology*, 57(1), 355-375.

Smith, J.L. and Rust, M.K., 1990, Tunneling response and mortality of the western subterranean termite (Isoptera: Rhinotermitidae) to soil treated with termiticides. *Journal of Economic Entomology*, 83(4), 1395-1401.

Su, N.Y., Scheffrahn, R.H. and Ban, P.M., 1991, Uniform size particle barrier: a physical exclusion device against subterranean termites (Isoptera: Rhinotermitidae). *Journal of Economic Entomology*, 84(3), 912-916.

Su, N.Y. and Scheffrahn, R.H., 1992, Penetration of sized-particle barriers by field populations of subterranean termites (Isoptera: Rhinotermitidae). *Journal of Economic Entomology*, 85(6), 2275-2278.

Tamashiro, M. and Yates, J.R., 1987, The formosan termite: Hawaii's most damaging insect. *Hawaii Architect*, 16(12), 12-14.

Tamashiro, M., Yates, J.R., Yamamoto, R.T. and Ebesu, R.H., 1991, Tunneling behavior of the formosan subterranean termite and basalt barriers. *Sociobiology*, 19, 163-170.

Verma, M., Sharma, S. and Prasad, R., 2009, Biological alternatives for termite control: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63(8), 959-972.

- Yanase, Y., Fujii, Y., Okumura, S., Yoshimura, T., Imamura, Y., Ishida, M., Kawaguchi, H. and Okumura, T., 2005, Application of particulate materials to a physical barrier against termites -effects of size, shape and surface properties of particles on the penetration behavior of termites-. Journal of the Society of Materials Science, 54(4), 387-391. (in Japanese with English abstract)
- Yanase, Y., Fujiwara, Y., Fujii, Y., Mori, T., Yoshimura, T. and Do, S., 2019, Evaluation of particulate materials as a physical barrier against penetration of *Reticulitermes speratus* under floor of experiment house. Wood Protection, 45(3), 114-121. (in Japanese with English abstract)
- Yates J.R., Grace, J.K. and Reinhardt, J.N., 2000, Installation guidelines for the basaltic termite barrier: a particle barrier to formosan subterranean termites (Isoptera: Rhinotermitidae). Sociobiology, 35(1), 1-16.
- Yates J.R., Grace, J.K. and Reinhardt, J.N., 2002, Creating installation guidelines for a particle barrier for formosan subterranean termites (Isoptera: Rhinotermitidae). Sociobiology, 40(1), 207-210.