

열 유동 시뮬레이션을 통한 바닥 난방과 온풍기의 빈대 구제를 위한 열처리 비교 분석

김태순¹, 박수현²

¹포항산업과학연구원 환경에너지연구소, ²한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Comparison of Heat Treatments by Floor Heating and Fan Heating for Bed Bug Control

Taesoon Kim¹, Suhyeon Park²

¹Environment and Energy Research Laboratory, Research Institute of Industrial Science and Technology, Gwangyang, Korea

²Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Goyang, Korea

Background: Non-chemical methods are as important as pesticides to control bed bugs. The most effective method is heat treatment. Underfloor heating is widely used in residential buildings in Korea, and the benefits of floor heating can be utilized in heat treatment for bed bug control.

Methods: Simulations of indoor air flow and heat transfer were performed to compare and analyze the temperature distributions with different heating methods for bed bug control using floor heating and fan heater methods.

Results: Even though the average indoor temperature of floor heating was lower, it was more uniform with floor heating than that of fan heating under the assumed conditions. Local cold spots disappeared with the floor heating method.

Conclusions: It was confirmed that floor heating has advantages over fan heating to achieve uniform high temperatures during heat treatment for exterminating bed bugs.

Korean J Health Promot 2023;23(4):217-225

Keywords: *Cimex lectularius*, Bed bug, Insect control, Heating

서론

1. 빈대의 특성

빈대(bed bug)는 노린재목 빈대과에 속하는 곤충으로 24개 속 110여 종이 보고되었는데 그중 사람을 흡혈하는 종

은 빈대(common bed bug, *Cimex lectularius*)와 반날개빈대(tropical bed bug, *C. hemipterus*)가 있는 것으로 알려져 있고 과거에는 *C. lectularius*만 국내에서 보고되었으나 2021년 *C. hemipterus*가 국내 처음으로 오산 지역에서 발견, 현재 국내에 2종 모두 분포하고 있다.¹⁾ 빈대는 납작하고 갈색이며 날개가 없고, 불완전변태를 하며 알, 4단계의 약충을 거쳐 성충이 된다. 성충의 크기는 5-6 mm이고 흡혈을 하면 약 10 mm까지 커질 수 있다. 성충 빈대는 최대 5-6개월 생존하며 빈대는 실온에서 먹이 없이 평균 70일을 생존할 수 있고, 빈대 몇 마리가 2-3개월 내에 수천 마리가 될 정도로 생존력과 번식력이 강하다.²⁾

빈대는 흡혈하지 않는 동안에는 어두운 곳, 벽, 벽지 틈,

■ Received: Nov. 21, 2023 ■ Revised: Dec. 13, 2023 ■ Accepted: Dec. 13, 2023

■ Corresponding author : Suhyeon Park, PhD

Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, 76 Hanggongdaehak-ro, Deogyang-gu, Goyang 10540, Korea

Tel: +82-2-300-0284, Fax: +82-2-3158-2191

E-mail: spark@kau.ac.kr

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6496-1092

전기 콘센트, 침대, 짐 등 눈에 잘 띄지 않는 곳에 숨어 지내고,²⁾ 주로 밤이나 이른 새벽에 동물의 피를 흡혈한다. 증상을 느끼지 않는 일부를 제외하고 많은 경우 빈대에 물린 부위에 피부 반응이 나타나며, 물린 직후 아침에 바로 나타나기도 하고 지연되어 수일 후 나타나기도 한다. 피부 반응은 소양성의 2-5 mm 크기의 반구진 홍반성 병변(maculopapular erythematous lesion)이 전형적이며 때로는 2 cm까지 커지기도 한다. 두드러기, 수포, 결절 등의 피부 반응이 나타나기도 하며, 드물게 피부 병변 가운데 물린 자국이 관찰되기도 한다. 소양성 병변을 긁어 발생하는 2차 감염으로 인해 농가진, 봉와직염 등이 발생할 수 있고 전신 반응으로 전신 두드러기, 천식 그리고 아나필락시스 반응이 보고되었다.²⁾

빈대는 미국, 호주, 유럽 등에서는 2000년대 중후반부터 크게 확산되었으나³⁾ 국내에서는 1970년대 이후로는 거의 발견되지 않았으며,⁴⁾ 2007년 뉴저지에 체류하던 사람이 국내에 들어와 빈대가 유입된 증례가 보고되었을 뿐이었다.⁵⁾ 그러나 최근 수년 사이 빈대가 국내 전역에 확산되고 있다.

일반적으로 빈대는 질병을 퍼트리지 않는다고 알려져 있으나 오래 전부터 빈대가 질병의 매개체일지도 모른다는 추측은 있어왔다. 약 50-100년 전에 작성된 오래된 문헌들에서 빈대가 흑사병, 황열, 결핵, 나병, 재귀열, 림프사상충증, 사가스병 등 다양한 병의 매개체(vector)일지도 모른다고 추정하였고,⁶⁾ 빈대가 철 결핍 빈혈의 원인이 될 수 있다는 증례 보고도 있었다.⁷⁾ 비록 우리의 문헌 검색에서 빈대가 특정 질환의 매개체로 명백하게 밝혀진 바는 없었지만 1970년 이후 다양한 신종 전염병이 발견되고 있는 점과 빈대의 행태를 고려하여 빈대가 새로운 병원체 획득 및 질병을 전염시킬 수 있을 것이라는 가설이 제시되기도 하였다.⁸⁾ 따라서 다시 확산되고 있는 빈대에 대해 적극적인 구제가 필요하다.

2. 빈대 구제

널리 알려진 빈대 구제 방법은 살충제 등의 화학 물질을 사용하는 방법과 열 소독 등의 비화학적 방법이 있다.⁹⁾ 빈대 구제를 위해 많은 경우 두 가지 이상의 방법을 병용하는 것이 권장된다.¹⁰⁾ 국외와 마찬가지로 국내에서 발견되는 두 종의 빈대 모두가 유기인산(organophosphates), 카바메이트(carbamate), 피레스로이드(pyrethroids) 등 일반적으로 사용되는 살충제에 대해 내성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다.³⁾ 그밖에 로테논, 페놀, 크레졸, 나프탈렌, 레탄 384, 등유, 테레빈유, 벤젠, 휘발유, 알코올 등의 화학물질이 사용되기도 하나 이들은 잔류 효과가 없기 때문에 일시적 효과 후 빈대가 다시 나타날 수 있고,⁹⁾ 봉산, 실리카겔, 규조토(이산화규소)와 같은 분진형 살충제를 도포하는 것은 폐질환을 일으킬 수 있다.^{9,11)} 비화학적 빈대 구제 방법의 대표적인 예

는 열처리와 진공청소기이며 다른 방법들에 비해 인체에 비교적 덜 해롭고 빈대가 내성이나 저항을 가지지 못한다는 장점이 있으므로 여러 연구자들은 빈대 방제에 비화학적 방법이 가장 중요하다고 주장한다.^{2,9)} 진공청소기로 침대 매트리스와 실내 공간을 청소하는 것은 비용에 비해 효과적이지만 보조 수단이라는 한계가 있다. 비화학적 방법 중 가장 중요한 방법은 열처리이다. 한국의 속담 중 ‘빈대를 잡다가 초가 삼간 태운다’는 말이 있는데 이것은 실내 온도를 높여 빈대를 사멸시키는 것이 옛 선조들 사이에서 통용되던 상식이었음을 의미하는 것으로 짐작된다. 실제로 1940-50년대까지도 온돌을 사용하는 한옥에서 실내 난방 온도를 높이는 방법이 빈대 퇴치에 자주 사용되었다.¹²⁾

3. 온돌

온돌이란 넓은 의미에서는 바닥을 가열하는 난방 방식이며, 그중 전통 온돌(구들)은 아궁이의 뜨거운 공기로 구들장을 가열한다. 20세기 초, 나무 땔감이 연탄으로 대체되면서 일산화탄소 중독 인명 사고가 늘어나자 미국 건축가 라이트(Frank Lloyd Wright)가 고안한 ‘온수 순환 바닥 난방’이 정책적으로 보급되어 전통 온돌을 대체하였다. 서구 현대 건축 기술이 도입되는 과정에서 연탄에서 석유, 가스 등으로 연료가 변화했지만 서구식 대류 난방 방식만은 한국 주거 공간에 정착되지 못했고, 대중 생활 양식은 바닥 난방을 유지하고 있다. 현재 한국에서 가장 흔하게 보이는 주거 난방 방식 역시 바닥 난방이다.¹³⁾

빈대는 50°C 이상에서 사멸하는 것으로 알려져 있다.¹⁴⁾ 외국에서 빈대 퇴치를 위해 주로 사용하는 전체 구조 열처리는 주택의 문과 창문을 닫은 채 고열의 공기를 실내에 순환시켜 주택 내장재, 가구, 침구, 생활용품 등을 모두 가열한다. 열처리 장치로는 주로 프로판 가스 히터나 전기 히터이며, 5-10 kW 정도의 열출력을 내는 열풍기(fan heater)가 대표적이다. 열처리를 시행하더라도 빈대가 온도가 비교적 낮은 장소로 이동해서 완전히 박멸되지 않을 수 있으므로 전체적으로 균일하게 고온을 유지하는 방식이 가장 큰 빈대 퇴치 효과를 보일 것으로 예상할 수 있다. 한국의 주거 공간에는 바닥 난방 방식이 널리 쓰이기 때문에 국내에서 빈대 구제에 전체 구조 열처리를 사용하기 유리하다는 큰 이점이 있다. 우리는 바닥 난방을 활용하면 빈대를 효과적으로 구제할 수 있을 것이라고 추측하였고, 일반적인 한국의 주거 공간에 적합한 방법으로써 바닥 난방을 이용한 빈대 구제의 열처리 효과를 추정하기 위한 열전달 시뮬레이션 분석을 하였다.

방 법

선행 연구에 의하면, 정밀한 온도 조절이 가능한 체임버(controlled environment chamber)를 사용한 전체 방 열처리 실험에서 성충의 치사 온도는 48.3°C, 알의 치사 온도는 54.8°C였다. 45°C에 노출된 성충 빈대가 사멸되는 시간은 94.8분, 알은 45°C에서 7시간, 48°C에서는 71.5분이었다.¹⁴⁾ 다른 선행 연구에서는 미국 버지니아 주 14개 아파트에서 열풍기 방식 난방(temp-air remediation system)을 사용하여 집 전체 온도를 상승시키며 빈대 치사 온도 55°C에 도달하는 시간과 빈대 구제 효과가 실내 혼잡도(levels of clutter)에 따라 달라지는지 확인하였다. 히터나 실내 물품 상태와 관계없이 실내 특정 위치는 치명적인 온도에 전혀 도달하지 못하는 것을 발견하였다. “차가운 지점”(cold spots)이라고 불리는 이러한 위치 중 일부에서는 빈대가 살아남을 수 있었던 것을 확인하였다.¹⁵⁾

효과적인 난방 방식과 온도 관리 효과를 분석하기 위해 본 연구에서는 상용 열유동 해석 소프트웨어인 Ansys FLUENT (ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA)를 사용하여 열전달 시뮬레이션을 수행하였다. 주요 가구를 포함하도록 가정된 침실에서 접합 열 유동 해석 기법으로 난방 효과에 직접 관련된 물리적 현상인 복사, 대류, 전도 열현상을 적용하여 실

내 공기 유동과 열전달을 해석하였다. 여기서 사용된 접합 열유동 해석(conjugate heat transfer) 시뮬레이션은 서로 다른 두 물질 사이에 일어나는 열교환의 상호작용의 결과로 일어나는 열전달을 확인할 수 있는 방법이다. 고체 내부에서 주로 전도의 형태로 일어나는 열전달과 구조를 통한 열 확산에 대한 정보와 함께 실내 공기를 통한 대류와 공간 내부에서 전해지는 복사를 포함한 해석을 동시에 수행할 수 있다. 고체 표면의 온도는 유체와 공간으로 열전달을 일으키는 원인이 되어 유동에 변화를 발생시키는 동시에 빠져나간 열로 고체 표면과 물체 내부 온도에 변화가 일어나서 다시 변화된 표면 온도가 열전달을 발생시키므로, 고체 부피 내부 열전도 해석과 유체와 공간에서 유동 해석을 번갈아가며 동시에 수행하는 원리로 작동한다. 본 연구에서는 shear stress transport (SST) $k-\omega$ 난류 모델과 Rosseland 열복사 모델을 적용하여 접합 열유동 해석 시뮬레이션을 수행하였다.

분석을 위해 실제 주거 공간을 단순화한 3차원 방 구조를 설정하였다(Figure 1). 방 내부에는 침대와 옷장이 위치하고 한쪽 벽에는 유리창과 철제 방문이 있다고 가정하였다. 침대는 헤드보드가 벽을 마주하도록 배치되어 있고 옷장은 구석에 가까이 위치하는데 이때 벽과 가구가 떨어진 거리는 각각 30 mm이고, 이 사이에는 30 mm 두께의 공기층이 존재한다. 편의를 위해 각 물체는 균일한 물성치를 가지는

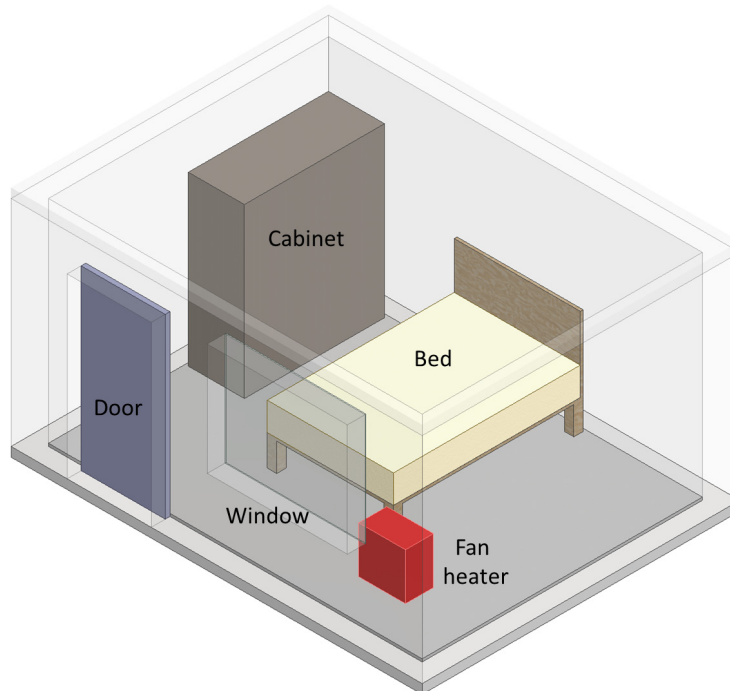


Figure 1. Configuration of a room for heating simulations. The gap between the wall and housewares are 30 mm, and all properties are assumed to be uniform within each object. The fan heater outlet is directed towards the bed headboard.

것으로 설정하였다.

동일한 방에 대하여 서로 다른 두 개의 난방 방식으로 바닥 난방(floor heating)과 열풍기(fan heater)를 동작하는 상황을 그림 2에 묘사하였다. 바닥 난방은 일반적으로 보일러에서 가열된 온수가 바닥 아래로 순환하면서 바닥 온도를 균일하게 상승시킴으로써 전도를 통해 방바닥으로 열이 전달되고 가열된 방바닥에서 방 전체 공간으로 열 복사와 자연 대류를 통해 열전달이 일어나도록 한다. 시뮬레이션에서는 바닥면 30 mm 아래 가열판에서 균일한 온도를 유지함으로써 바닥 난방이 이루어지도록 하였다. 한편 열풍기는 방 내부 바닥 가까이에 위치하며 방 안의 공기를 흡입하고 가열하여 온풍을 공급한다. 이때 열풍기로부터의 열전달은 그림과 같이 강제 대류가 지배적으로 일어난다. 바닥 난방을 사용할 때는 열풍기가 단순한 물체로 다루어지며, 열풍기가 작동할 때는 바닥에서 발열이 일어나지 않는다. 난방에 사

용된 열은 네 방향에 있는 콘크리트 벽과 유리창, 방문을 통해 빠져나가며, 아파트와 같은 복층 구조를 염두에 두고 위와 아래쪽 바깥면은 단열 처리된 것으로 가정하였다. 외벽은 콘크리트로 이루어져 있으며 0°C인 외부 공기로 대류 열전달을 통해 열을 방출한다고 가정하였다. 시뮬레이션 결과는 두 방법이 비슷한 실내 온도에 도달하여 시간에 따른 변화가 없는 정상 상태(steady state)를 유지하는 동안 방 내부 온도 분포를 비교 관찰하였다.

결 과

난방 방식에 따른 방 안 온도 상승을 비교하기 전에 먼저 공기 유동의 특징을 이해하여야 한다. 방 내부 공간의 단면에 대해 오른쪽에서 본 공기 속도 장 분포가 그림 3에 나타나 있다. 유선 분포에서 특징적인 것은 바닥 난방에서 보이는

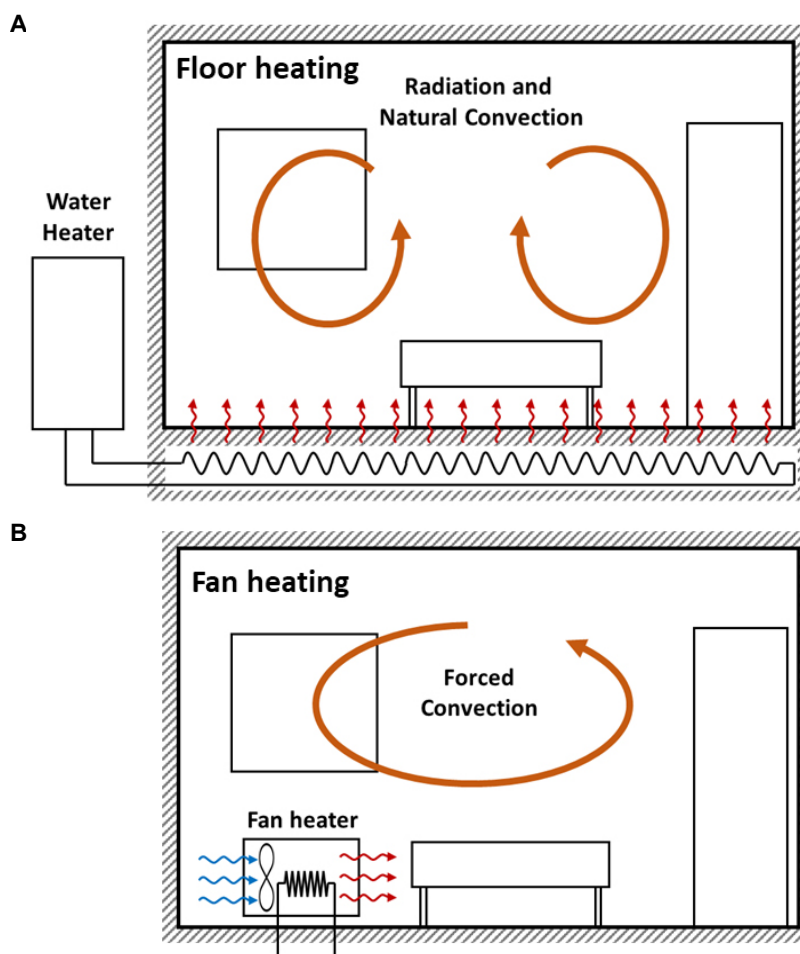


Figure 2. Schematics of room heating methods; floor heating (A) and fan heating (B). Floor heating method is typically accomplished by underfloor water pipings which provide uniform temperature underside of floor material. Fan heating method is when an electrical fan heater is located inside the room which pull in the room air and supplies heated air.

자연 대류는 그 양상과 구조가 3차원적으로 복잡하다는 것을 볼 수 있고 열풍기의 강제 대류와 비교하여 속도 벡터 크기가 매우 작은 것을 알 수 있다. 대류 열전달의 크기는 유속과 밀접한 관계가 있으므로 바닥 난방인 경우는 대류 열전달의 비율이 작고 상대적으로 복사 열전달의 비중이 크다. 열풍기 난방에서는 열풍기에서 공급된 바람으로 높은 공기 유속이 전체적으로 형성되면서 강제 대류가 일어나서 열전달이 높다. 벽 근처의 유동 속도 값이 높으며, 열풍기로 가열한 경우 한 방향으로 회전하는 공기 유동이 강하게 형성되므로 벽면 위치와 방향에 따라 열전달 양상에 큰 차이를 보인다. 침대 머리 방향 바닥 근처는 속도가 높은 반면, 침대 반대쪽 바닥 구석은 열풍기 반대쪽에 위치하므로 유속이 낮은 것이 그림에 상반된다. 바닥 난방에서는 벽면에서 유속이 작기 때문에 비슷한 수준의 난방을 제공하는 성능에

서는 위치에 관계없이 방 전체의 벽면이 비교적 균일하게 가열될 것을 예상할 수 있다. 그러나 가열되는 속도는 같은 열출력을 가지는 경우 열풍기에 비해 가열 시간이 오래 걸릴 것으로 속도 분포를 통해 예측할 수 있다.

시뮬레이션을 통해 형성된 방 내부 열 분포 또한 두 난방 방식에 따라 큰 차이를 보인다. 그림 4에서 방바닥과 내부 물체에 대한 표면 온도 분포(왼쪽)와 내부 단면을 오른쪽 면에서 본 공기와 물체 내부 온도 분포를 보여준다. 바닥 난방인 경우 방바닥 온도는 균일하고 높은 온도이며, 열풍기 난방은 바닥 온도와 내부 공기가 비슷한 온도를 가진다. 여기서 열풍기 난방에서 네모통이 구석 위치에서 바닥 온도가 낮은 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 이것은 기하학적 구조상 외부 열손실에 비해 가열되는 열량이 적기 때문이며 국소적으로 차가운 지점(cold spot)이 형성되는 지점 또한 네모통

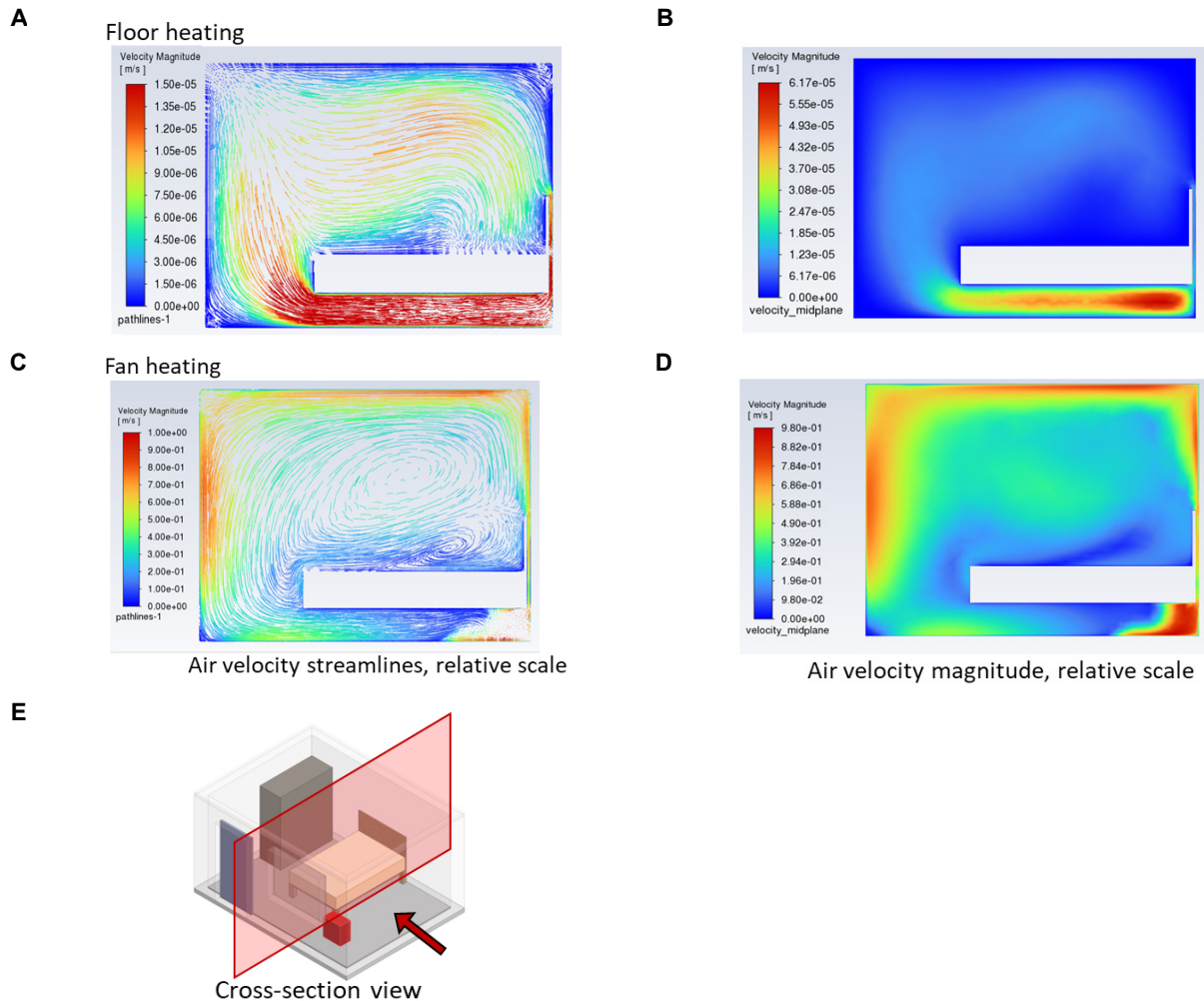


Figure 3. Cross-section view of air velocity induced by different heating methods. (A) and (B) are showing air velocity streamlines and air velocity magnitude contour with floor heating condition. (C) and (D) are showing fan heating condition. (E) Is showing the projection plane for (A-D) with the arrow indicating the viewpoint direction.

이에 해당한다. 주어진 조건에서 실내 평균 공기 온도는 열풍기 난방이 더 온도가 높으나, 바닥 난방에서 보이지 않는 차가운 지점이 열풍기 난방 시에 더 확연히 나타난다는 점은 빈대 구제를 위한 균일한 고온 열처리 조건을 달성하기에 바닥 난방이 열전달 측면에서 유리한 점이 있음을 시사한다.

방 안에 배치된 물체의 표면 온도 역시 난방 방식에 따른 차이가 그림 5에서와 같이 나타난다. 바닥 난방에서는 전체적인 온도는 낮게 유지되었으며 각 표면에서 분포를 비교하면 상대적으로 가구에 차가운 지점이 적은 것을 볼 수 있다. 열풍기 난방인 경우 가구 표면에서 전체적인 온도는 높지만 일부 표면에서 차가운 지점이 존재하며 특히 구석 벽면에

가까운 옷장 모퉁이는 난방 효과를 거의 받지 않는 것으로 분석되었다. 이러한 영향은 바닥 난방에서도 관찰되었으나 열풍기에서 최저 온도가 바닥 난방에서 최저 온도보다 더 낮았다. 벽면과 옷장 사이에 있는 30 mm의 공기층에 열풍기의 강제 대류의 영향은 미미하며 자연 대류에 의한 열전달이 지배적이기 때문이다. 따라서 바닥쪽 위치가 위쪽보다 상대적으로 낮은 온도가 유지되는데 바닥 난방인 경우는 바닥에서 자연 대류로 전달되는 열에 의해 차가운 지점이 제거된다. 다시 말해 바닥 구석에 위치한 차가운 지점이 바닥 난방에 의해 원활하게 가열되므로 방 전체에 차가운 지점이 줄어드는 효과가 일어난다. 문헌에서 알려진 열풍기를 사용한 실제 빈대 구제 현상에서 벽과 바닥이 만나는 지점, 옷장

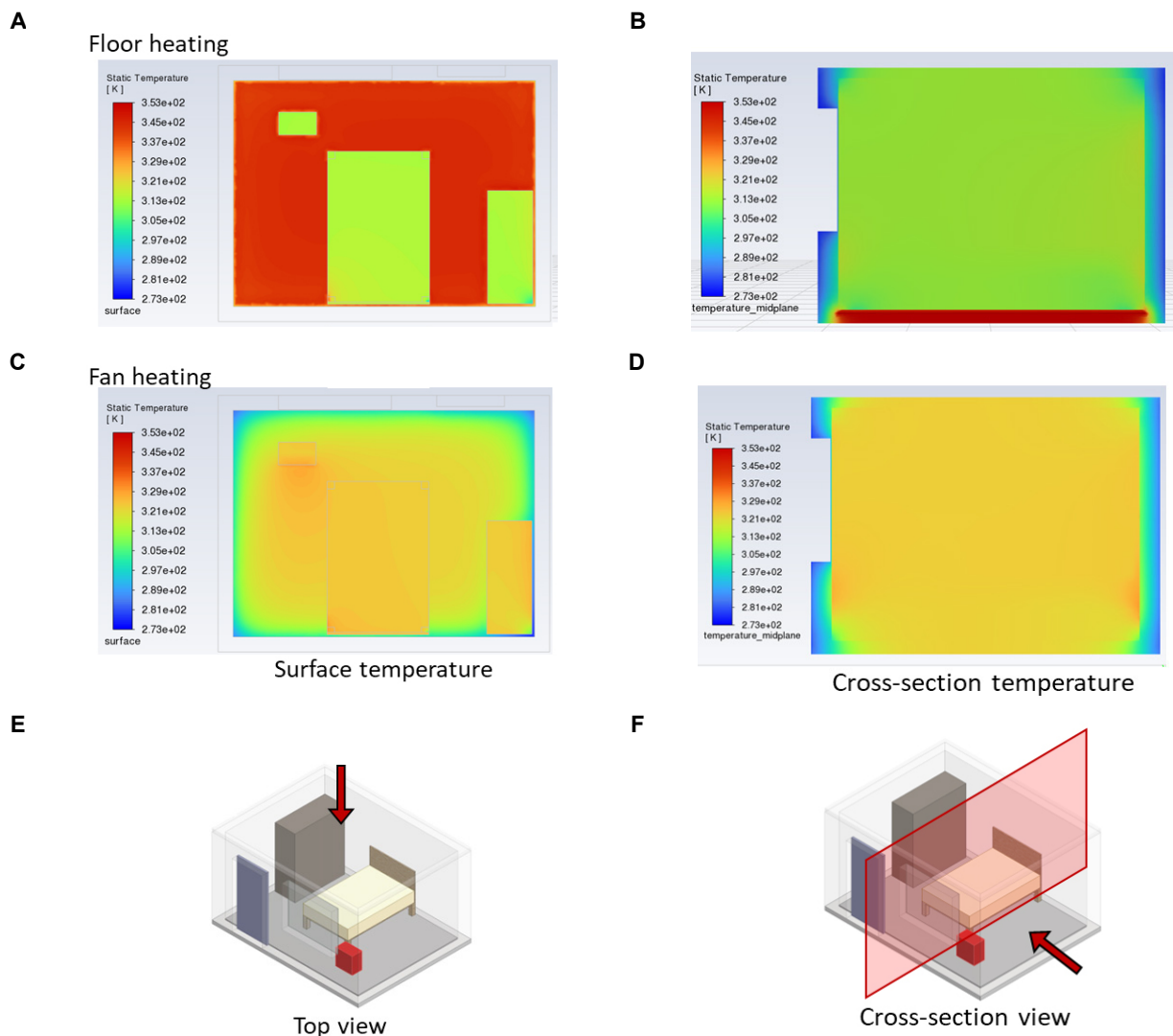


Figure 4. Top view of surface temperatures and cross-section temperature distributions. (A) and (B) are showing top view of surface temperature and side view of cross-section temperature with floor heating condition. (C) and (D) are showing fan heating condition. (E) and (F) are showing the projection plane for (A, C) and (B, D) respectively with the arrows indicating the viewpoint directions.

구석 바닥, 쌓아둔 옷 뭉치의 바닥면 등에 차가운 지점(cold spot)이 형성되어 빈대 구제가 어려워진다는 사실과 본 연구에서 열풍기 시뮬레이션 결과로부터 차가운 지점이 형성되는 결과가 서로 일치한다.^{14,15)}

각 물체의 표면 온도가 주어진 표 1에서 정확한 온도 차이를 알 수 있다. 가구는 벽면에 비해 비교적 균일하게 가열되는 경향이 나타나며 바닥 난방이 열풍기 난방보다 2.1-6.6°C 정도 낮은 온도값을 보인다. 실내 전체 영역에서 가장 낮은 온도가 관찰되는 지점은 벽면 실내 표면에서 발생한다. 따라서 벽면의 온도와 벽면 온도의 최소값을 비교하는 것으로 난방 방식 사이에 차가운 지점 온도의 경향을 비교할 수 있다. 벽면의 평균 온도는 바닥 난방과 열풍기 난방에서 각각

299.6 K, 302.0 K로 열풍기보다 바닥 난방일 때 벽면 온도가 2.4°C 낮다. 그러나 최소 온도값은 오히려 반대로 바닥 난방이 열풍기 난방 때보다 높았다. 이것은 방에서 가장 차가운 지점, 빈대가 전체 구조 열처리를 실시할 때 대피처로 사용할 수 있는 지점의 온도를 높이기 위해 바닥 난방이 더 유리하다는 의미이다. 만약 두 방식을 사용해서 각각의 실내 온도를 비슷한 정도로 일치시킨다면 가장 차가운 지점의 온도는 바닥 난방일 때가 6.1°C 높을 것으로 예상된다. 마찬가지로, 비슷한 평균 온도에 도달한 가열된 실내에서 빈대의 사멸 온도 기준인 50°C 이하에 머무는 차가운 지점은 열풍기보다 바닥 난방일 때 더 많다. 다른 의미로 본다면, 실내 전체 온도를 빈대의 사멸 온도로 올리는 것은 바닥 난방일 때 더

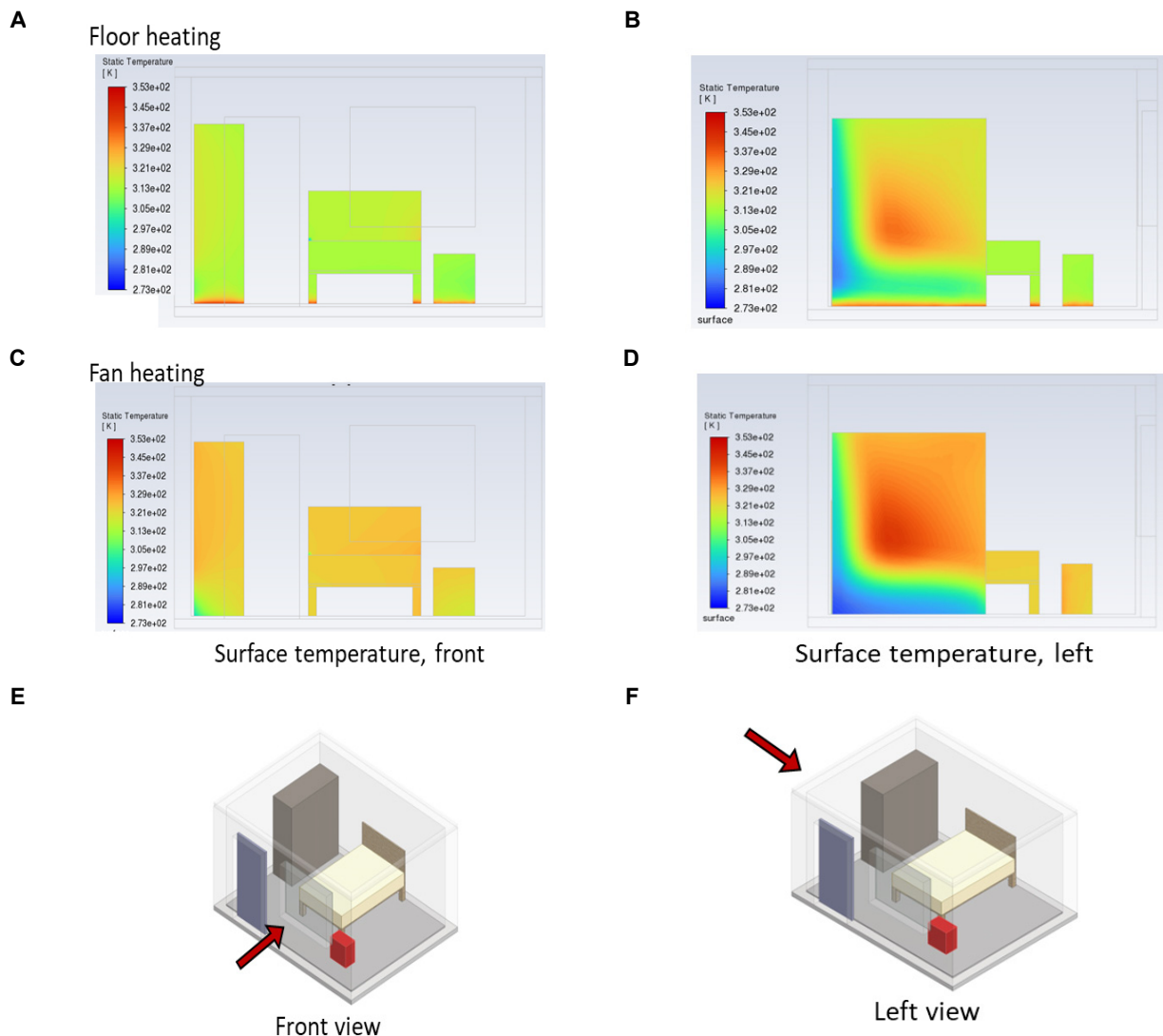


Figure 5. Front view and left view of surface temperatures on housewares. (A) and (B) are showing front view of surface temperature and left view of surface temperature with floor heating condition. (C) and (D) are showing fan heating condition. (E) and (F) are showing the projection plane for (A, C) and (B, D) respectively with the arrows indicating the viewpoint directions.

Table 1. Surface temperatures by heating methods at different locations

Temperature	Floor heating	Fan heating	Difference
Wall (average)	299.6 K	302.0 K	-2.4°C
Wall (minimum)	280.2 K	276.5 K	3.7°C
Wall (maximum)	331.5 K	316.4 K	15.1°C
Closet (average)	314.5 K	316.6 K	-2.1°C
Bed frame (average)	313.7 K	320.3 K	-6.6°C
Matress (average)	314.3 K	320.1 K	-5.8°C

Difference values are floor heating method values subtracted by fan heating method values.

효율적으로 달성할 수 있다는 뜻이다. 두 시뮬레이션에서 각각의 열원이 공급한 열량은 바닥 난방에서 7.12 kW였고, 열풍기에서 9.67 kW였으며, 열풍기가 공급하는 열량이 바닥 난방보다 약 36.0% 많았다.

고 찰

빈대는 특이한 생활사로 인해 구제하기 어려운 곤충이다. 과거에는 빈대를 dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT)을 이용해 박멸하였으나, DDT가 유해성으로 인해 사용 금지되었고 빈대가 DDT, 피레스로이드 등의 다양한 살충제에 내성을 가지게 되어 현재는 과거보다도 빈대를 박멸하기 더욱 어려워졌다. 그러나 빈대는 여전히 열에 약하며 그렇기 때문에 빈대를 구제하기 위해서는 단순한 살충제 사용만 사용하는 것보다 열을 함께 이용하는 것이 더 효율적이다.

과거에는 DDT를 사용하기도 하였으나 이미 1970년대에도 DDT에도 내성이 보고된 바가 있고¹⁶⁾ 현재는 유해성 문제로 DDT와 같은 강력 살충제를 쓰지 못하는 상황이다. 현재의 살충제는 과거 DDT보다도 살충력이 떨어지면서도 내성이나 저항성이 증가를 우려하는 상황이며 이러한 화학적인 방법 단독으로는 충분한 살충력을 가질 수 없다. 그렇기 때문에 비화학적인 방법이 필수적으로 병용되어야 한다.¹⁷⁾

가장 효과적인 비화학적인 빈대 구제 방법은 열처리이다. 전체 주거 공간 열처리를 적용하기 위해서는 높은 온도를 균일하게 유지해야 빈대가 피난처로 숨지 못하고 효과적으로 퇴치된다. 국내 주거환경에서 널리 쓰이는 바닥 난방을 사용하면 차가운 지점이 적고 열풍기를 사용하는 방법보다 더 균일한 온도를 유지할 수 있어서 효율적인 빈대 구제가 가능하다. 시뮬레이션을 통해 바닥 난방을 사용하는 경우 열풍기보다 약 36.0% 더 적은 열량을 사용하였으므로 바닥 난방이 열풍기보다 빈대 구제에 비용면에서도 더 유리하다고 볼 수 있다. 바닥 난방과 열풍기를 포함하여 공간 전체 열처리 방법으로 빈대를 구제할 때는 고온에 의한 물품 손상 피해를 주의해야 하고 사람이나 동물이 열에 의한 피해를 입지 않도록 주의해야 한다. 실제로 열풍기 사용 후 노인

이 사망한 사례가 알려져 있다.¹⁸⁾

우리의 조사에 따르면 본 연구는 바닥 난방으로 빈대의 사멸 온도를 달성하기 위한 균일한 열처리 조건에 대하여 처음으로 연구한 논문이다. 바닥 난방과 열풍기 강제 대류를 비교하여 바닥 난방이 빈대 구제를 위한 균일한 고온 열처리를 달성하기 위한 장점이 있음을 밝혔다. 본 연구의 한계는 실제 공간에서 빈대를 대상으로 진행한 실험이 아니라 온도만을 조사한 시뮬레이션 연구라는 것이다. 바닥 난방이 흔하지 않은 외국에서도 이러한 시도는 알려지지 않았으며, 한국에서 1970년대 이전을 경험한 세대로부터 구전되는 바닥 난방을 이용한 빈대 구제에 대한 체계적인 분석이나 검증한 선행 연구는 현재까지 없는 것으로 조사되었다. 실제 공간에서 해충을 사용한 실험을 진행하기 전에 필요한 조건을 확인하는 데에 본 연구의 시뮬레이션 결과가 기초 근거를 제공할 수 있다. 이 결과를 바탕으로 향후 주거 환경에 준하는 환경에서 바닥 난방이 열풍기보다 빈대 구제에 효과가 있는지 확인하는 연구가 필요할 것이다.

요 약

연구배경: 빈대 구제에는 살충제 외에도 비화학적인 방법이 중요하며 가장 효과적인 방법은 열처리이다. 바닥 난방이 주거용 건물에 널리 쓰이는 한국에서는 이러한 열처리에 바닥 난방이 가진 이점을 살릴 수 있다.

방법: 실내 공기의 유동과 열전달을 모사하는 시뮬레이션을 수행하여 바닥 난방 방식과 열풍기 방식으로 빈대 구제를 위한 열처리가 적용되는 상황에서 각각의 온도 분포를 비교 분석하였다.

결과: 가정한 조건에서 바닥 난방의 실내 온도는 열풍기 난방보다 평균이 낮지만 보다 균일했고, 국지적으로 차가운 지점이 바닥 난방일 때 사라졌다.

결론: 빈대 구제를 위한 균일한 고온 열처리에 바닥 난방이 열풍기보다 유리한 점이 있음을 확인하였다.

중심 단어: *Cimex lectularius*, 빈대, 곤충 구제, 난방

ORCID

Taesoon Kim <https://orcid.org/0000-0002-9264-5361>
 Suhyeon Park <https://orcid.org/0000-0002-6496-1092>

REFERENCES

1. Agency KDCaP. Bed bug information book. 2ed ed. Cheongju: Korea Disease Control and Prevention Agency; 2023. p.5-6.
2. Parola P, Izri A. Bedbugs. *N Engl J Med* 2020;382(23):2230-7.
3. Doggett SL, Dwyer DE, Peñas PF, Russell RC. Bed bugs: clinical relevance and control options. *Clin Microbiol Rev* 2012;25(1):164-92.
4. Byun Y, Yang YS, Kim JH, Cho BK, Lee IY, Kim H, et al. Bedbug bite. *Korean J Dermatology* 2015;53(2):157-9.
5. Lee IY, Ree HI, An SJ, Linton JA, Yong TS. Reemergence of the bedbug *cimex lectularius* in Seoul, Korea. *Korean J Parasitol* 2008;46(4):269-71.
6. Goddard J, deShazo R. Bed bugs (*cimex lectularius*) and clinical consequences of their bites. *JAMA* 2009;301(13):1358-66.
7. Pritchard MJ, Hwang SW. Cases: severe anemia from bedbugs. *CMAJ* 2009;181(5):287-8.
8. Pietri JE. Case not closed: arguments for new studies of the interactions between bed bugs and human pathogens. *Am J Trop Med Hyg* 2020;103(2):619-24.
9. Koganemaru R, Miller DM. The bed bug problem: past, present, and future control methods. *Pestic Biochem Physiol* 2013;106(3):177-89.
10. Haynes KF, Potter MF. Recent progress in bed bug management. In: Ishaaya I, Palli SR, Horowitz AR, eds. *Advanced technologies for managing insect pests*. Dordrecht: Springer Netherlands; 2013. p.269-78.
11. Lee JY, Chae WR, Huh DA, Moon KW. Environmental exposure to mercury, cadmium, and pyrethroid pesticide and its association with delayed puberty in children: Korean National Environmental Health Survey (KoNEHS). *J Environ Health Sci* 2021;47(3):245-58.
12. Lim TG. Fear of re-emergence of bed bugs... How to search and remove 'hiding places' in the bedroom [Internet]. Seoul: The Farmers Newspaper; 2023 [cited Nov 21, 2023]. Available from: <https://www.nongmin.com/article/20231016500353>.
13. Korea Boiler Engineering Association. 'Ondol is science'. KBEA 2007;160(5):140-9.
14. Kells SA, Goblirsch MJ. Temperature and time requirements for controlling bed bugs (*cimex lectularius*) under commercial heat treatment conditions. *Insects* 2011;2(3):412-22.
15. Catron KA, Wilson MS, Miller DM. Efficacy of thermal remediation for bed bug (hemiptera: cimicidae) control in apartments of different clutter levels. 9th ed. Birmingham: International Conference on Urban Pests; 2017. p.61-5.
16. Cha CH, Ham KS, Yoon JJ, Hwang JH, Lee KW, Koo SH. Insecticide resistance in bedbugs (*cimex lectularius*) in Korea. *Kisaengchunghak Chapchi* 1970;8(1):5-7.
17. Singh N, Wang C, Zha C, Cooper R, Robson M. Testing a threshold-based bed bug management approach in apartment buildings. *Insects* 2017;8(3):76.
18. Sanford MR, Torres M, Ross J. Unexpected human fatality associated with bed bug (hemiptera: cimicidae) heat treatment. *J Forensic Sci* 2019;64(2):622-4.