JESK J Ergon Soc Korea 2021; 40(6): 373-388
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2021.40.6.373
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

Evaluation of Wearability of Air-Cooling Vests using Vortex Tubes and Applicability of These to Farming Sites - Centered on Greenhouse Workers

Insoo Kim, Sooin Park, Hye-Seon Chae, Kyungran Kim

National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Jeonju-si, 54875

보텍스 튜브를 적용한 에어냉각조끼에 대한 착용성 및 농작업 현장 적용성 평가 - 비닐하우스 작업자 중심으로

김인수, 박수인, 채혜선, 김경란

농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부

Corresponding Author
Kyungran Kim
National Institute of Agricultural Sciences,
Rural Development Administration,
Jeonju-si, 54875
Email : kimgr@korea.kr

Received : September 10, 2021
Revised : September 26, 2021
Accepted : November 18, 2021

Copyright@2021 by Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

Objective: This study developed air-cooling vests using vortex tube technology to prevent thermal diseases from farmers, and conducted evaluation of their applicability to farming sites for farmers cultivating crops in greenhouses.

Background: The number of high-temperature and heat-wave days in summer is gradually increasing, according to which farmers' risks of exposure to heat are increasing to require development of personal protection equipment for safety. For this, various researches were carried out, but had difficulties in being applied to farming environments. Recently, excellent cooling effects were reported in researches of cooling vests for farming using vortex tube technology, but they were basic researches centered on laboratories to have limitations in being applied to farming sites. Thus, an empirical study is required in verification of their effects on applicability to farming and solution of problems.

Method: This study evaluated temperature/humidity in garments, subjective wearing sense, experience satisfaction and farming site applicability when air cooling vests were worn by farmers cultivating crops (tomato, lettuce, strawberry) in greenhouses for demonstrative study at farming sites.

Results: The study results showed that wearing the developed air-cooling vests reduced temperature by 11.9% and humidity by 19.0% compared to the existing work clothes (p< .0001). The subjective wearing sense was more superior to the existing work clothes to enable pleasant working. In addition, the results of evaluating experience satisfaction and farming environment applicability after using air cooling vests showed a very positive reaction to confirm applicability to farming sites.

Conclusion: This study discovered that the air-cooling vests using vortex tube technology are an effective tool in preventing thermal stress from farmers cultivating crops in vinyl greenhouses. In the future, studies will be continuously carried out on plans for efficient application to various farming to enlarge and supply the air-cooling vests developed by this study.

Application: It is expected that the results of this study will be able to be used in the farming-protective equipment technology design field for reduction of thermal stress.

Keywords: Air-cooling vest, Vortex tube, Personal protective equipment, Greenhouse, Thermal stress

1. Introduction

최근 5년간(2016-2020년) 여름철 폭염으로 인한 온열질환자는 연평균 2,229명으로 그 중 농림어업종사자 252명(12.2%) 발생하였다(KCDC, 2020). 우리나라 폭염 인명피해 발생 특징에 관한 연구에 따르면 여름철 폭염의 강도와 빈도가 점점 증가하는 추세이고(Kim et al., 2019), 이러한 폭염 피해는 도시보다 농촌지역이 더 취약 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2014). 특히 비닐하우스 작물 재배 농업인은 고온의 작업 환경에 노출되기 쉽고, 생리적으로 고온에 대한 순응이 상대적으로 취약한 65세 이상 고령자 및 기존에 질환이 있는 경우 일반인 보다 열스트레스에 취약하므로 주의가 요구된다(Lee et al., 2018). 비닐하우스 내에서의 작업은 밀폐된 고온 다습한 환경에서 작업이 이루어지므로 열탈진, 열사병 등 열스트레스 관련 질환(Roh, 2012; Hwang et al., 2010; Lee et al., 2006) 발생과 더불어 안전사고로 이어질 수 있어 농업인을 위한 작업 환경 설계는 중요하다(Kim et al., 2018a; Kim et al., 2020).

국내 시설 채소 면적은 2018년 기준으로 51,226ha이며, 이 중 비닐하우스를 기반으로 한 시설 농업 면적은 50,876ha 전체 시설 면적의 99%에 이르고 있다(MAFRA, 2019). 비닐하우스의 경우 대규모의 기계 시설 또는 유리온실 기반의 농업 시스템과 달리 농업 노동이 많이 수반되고 있으며, 비닐하우스의 면적이 절대적으로 큼에 따라 온열질환 관련 농부증이나 하우스증과 같은 건강장애를 초래할 수 있다. 일반적으로 여름철 비닐하우스 작업장에서 대부분의 면 소재, 폴리에스터 소재 원단의 작업복을 착용하고 있지만(Choi and Ashdown, 2002), 열과 흡수된 땀의 축적으로 인하여 불쾌감이나 작업능률 저하로 이어질 수 있다(Hwang et al., 2010). 고온 환경에 노출된 작업자의 열스트레스 관련 질환 예방을 위한 대책으로 공조 시설 및 에어컨디셔닝(Air conditioning) 설치 등이 고려될 수 있으나 비닐하우스의 경우 작목의 생육을 위한 온도와 습도 조건이 유지되어야 하고, 생산성 저하가 유발될 수 있으므로 적용에 어려움이 있다. 이에 따라 서열스트레스 예방을 위한 다양한 기능성 소재를 적용한 작업복 개발 연구가 있었으나(Myung et al., 1993; Choi and Baik, 1995; Hwang et al., 2010), 여름철 30℃ 이상 비닐하우스 내부 작업 환경에서는 장시간 작업할 경우 열부담이 가중되어 적용하기에는 한계가 있다(Kim et al., 2020). 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 인체의 산열과 방열의 균형을 유지하여 체온 상승을 제어하는 수단으로 의복에 보조 냉각 시스템을 부가하여 열평형 문제를 해결하는 것이 실용적인 방법이 될 수 있다(Kwon et al., 2000a). 기존의 보조 냉각 시스템을 적용한 연구를 살펴보면, 냉매를 의복 내에 삽입하여 인체로의 냉기 유입을 전달하는 냉각조끼 개발 연구에서 체온 저감에는 효과가 있었으나 냉매로 인한 중량감 및 발한에 따른 과도한 습윤감 문제가 지적되었고(Kwon et al., 2000a; Kwon et al., 2000b), 냉각 지속 시간의 연장과 중량으로 인한 에너지 대사량 증가 등에 대한 해결이 요구되었다(Choi and Hwang, 2001; Choi et al., 2005; Jung et al., 2020). 또한 열전소자(Thermoelectric module)를 사용하는 냉각 방식을 의복에 적용한 연구가 있었으나(Jung et al., 2012), 이 연구에서는 온열감과 쾌적감에 긍정적 반응을 보인 반면 의복 내에 분포되는 온도의 표준편차가 상대적으로 크고 전력 소비와 전원 공급의 제한점이 발견되었다. 최근에는 나일론 스판덱스(Nylon spandex) 소재에 튜브를 붙이거나 끼워 10℃와 15℃의 냉각 조건에서 일정한 온도의 물이 순환할 수 있도록 하여 인체로부터 열을 외부로 방출시킬 수 있는 액체 냉각복에 대한 연구(Jung et al., 2020), 보텍스 튜브(Vortex tube) 기술을 적용하여 냉각공기를 의복 내에 공급하여 온도와 습도를 저감하는 에어냉각조끼 개발 연구가 있었다(Kim et al., 2020). 액체 냉각복의 경우 주관적 반응에 긍정적인 결과를 가져왔으나 냉각된 물을 공급하는 라인의 무거운 무게로 인하여 고정 작업자에는 적합하나 활동량이 많은 농작업의 경우에는 적용하는 데에는 한계를 보였다. 반면에 Kim et al. (2020)의 연구에서 보텍스 튜브를 적용한 에어냉각조끼는 농업인을 위한 서열스트레스 저감 작업복으로 제안되었고, 온도와 습도를 저감 및 쾌적감 향상에 효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 인공기후실 및 테스트 베드 온실에서의 실험 연구로 실제 농작업 환경 및 작업 특성이 충분히 고려되지 않아 실제 농업 환경에서의 효과 검증, 제품 사용성 및 에어냉각조끼 시스템 설치 용이성 등에 대한 추가 연구가 요구된다.

따라서 이 연구는 농업인의 온열스트레스 예방을 위하여 냉각 보조 도구인 보텍스 튜브를 이용한 Kim et al. (2020)의 연구에 기초하여 개선된 에어냉각조끼를 비닐하우스 작물 재배 농업인을 대상으로 인체생리학적 반응 측정, 사용 경험 만족도, 농작업 현장 적용성 등을 평가하였다.

2. Development of Air-Cooling Vests Using Vortex-Tube

2.1 Overview of air-cooling vest development

보텍스 튜브는 공기의 냉각 처리 원리를 이용한 기술로 압축된 고압의 원료 공기를 고속회전을 통해 고온과 저온의 공기로 분리시켜

저온의 차가운 공기를 이용할 수 있도록 고안한 장치이다(Xue et al., 2010). 또한 어떠한 화학 반응 없이 저온의 공기를 얻어 낼 수 있어서 환경오염이 없을 뿐만 아니라 작물 재배 환경에 온도 등의 영향이 없어 다양한 농작업 환경 조건 하에서도 이용이 가능한 장점이 있다(Oh and Choi, 2004; Kim et al., 2018b; Choi et al., 2018). 보텍스 튜브를 활용한 냉각 기술은 일반적으로 자동차 공조 시스템, 식품제조업 냉기류 분사 등 장치에 적용되고 있고, 고열의 작업 조건을 갖고 있는 조선소 등 중공업 근로자의 열스트레스 예방을 위한 작업복에도 활용되고 있다. 최근에 Kim et al. (2020)의 연구에서 최초로 보텍스 튜브 기술이 적용된 농업인용 냉각조끼 개발이 진행되었다. 이 연구에서 인공기후실(Environmental chamber)과 테스트 베드(Test bed) 온실 실험을 통해 서열스트레스 저감에 효과가 있음을 밝혀 농작업 현장에 적용 가능성이 있는 것으로 보고되었다. 이 연구에서는 기존에 연구되었던 농작업용 에어냉각조끼(V.1.0) (Kim et al., 2020)의 실용화를 위하여 보다 농작업 환경에 적합하도록 개선한 에어냉각조끼(V.2.0)을 개발하였고, 비닐하우스 작물 재배 농업인을 대상으로 착용성 평가와 농작업 현장 적용성 평가를 수행하였다.

2.2 New air-cooling vest V.2.0 and system components

Figure 1은 보텍스 튜브 기술을 활용한 에어냉각조끼를 보여준다. 기존의 에어냉각조끼(V.1.0)는 안감과 겉감 모두 메시(Mesh) 소재로 제작되었고, 보텍스 튜브를 통해 배출되는 냉각공기를 안감과 겉감 사이에 설계된 냉각공기 공급 라인을 통해 분사하는 형태이다. 그러나 외부의 높은 온도로부터 온도 손실을 최소화하기 위해 겉옷을 별도로 착용해야 하는 불편함이 있다(Figure 1(a)). 이 연구에서 개선한 에어냉각조끼(V.2.0)는 안감은 메시 소재를 적용하였고, 겉감은 저온의 공기 유출을 최소화하기 위해 폴리에스테르(Polyester) 원단을 사용하여 겉옷 착용 없이 활용이 가능하다(Figure 1(b)). 그리고 효율적인 인체 냉감 효과를 고려하여 인체의 냉점 부위(가슴, 등, 배)로 냉각공기 공급 라인이 경유하도록 설계하였다(Choi and Seol, 1999). 또한 에어냉각조끼(V.1.0)의 냉각공기 공급 라인이 경질의 편사 소재가 적용되어 작업 시 움직임에 불편함이 존재하여, 이를 개선하기 위해 에어냉각조끼(V.2.0)에는 연질 PVC (Poly vinyl chloride) 소재를 적용하여 활동 편이성을 향상하였다. Figure 1에서 점선은 조끼 내부에 설계된 냉각공기 공급 라인을 표현한 것이다.



(a) Air-cooling vest V.1.0 (b) Air-cooling vest V.2.0

Figure 1. Comparison of Air-cooling vest V.1.0 and V.2.0

개발된 에어냉각조끼 시스템은 공기압축기(NKP7, NEOKOREA Co., Ltd.), 공기압력조절기(UFR300-10, YPC, Korea), 필터(302V, PARKER, USA), 압축공기 공급 라인, 보텍스 튜브 장치, 에어냉각조끼, 냉각공기 공급 라인 등으로 구성된다. 이 연구에 사용된 공기압축기는 최대 압력 99,000kPa까지 가능하고, 공기압력 조종기(Regulator)는 출력 0~100,000kPa까지 제어가 가능하다. 이 연구에서는 실험은 60,000~80,000kPa 범위로 설정하였다. 압축공기 공급 라인은 공기압축기의 압축된 공기를 보텍스 튜브까지 전달하는 호스로 우레탄 소재의 10mm 규격을 사용하였다. 의복 내 냉각공기 분사용 냉각공기 공급 라인은 8mm 규격이 적용되었다. 보텍스 튜브 장치는 무게가 150g이고, 냉각 성능은 압축공기 40,000 kPa, 공급유량은 250L에서 현재 측정 시점의 외부 온도 대비 15.7℃를 낮출 수 있다. 에어냉각조끼 시스템의 주요 구성 요소는 Table 1 같다.

Figure 2는 실험에 사용된 에어냉각조끼 시스템의 개략도이다. 공기압축기에서 생성된 압축공기는 필터, 압축공기 공급 라인을 통해 보텍스 튜브 장치로 전달되고, 보텍스 튜브 장치에서 분리된 차가운 공기를 에어냉각조끼로 유입하게 된다. 에어냉각조끼 내로 유입된 차가운 공기는 의복 내 냉각공기 공급 라인을 통해 조끼 내부에 분사시켜 의복 내 온도와 습도를 낮추게 되는 구조이다.

Table 1. Specifications of main composition of an air-cooling system

Item	Model	Specification
Air compressor	NKP7	Max. air pressure: 99,000kPa Power: 5.5Kw Tank volume: 148L
Air pressure regulator	CL.1.5	Maximum pressure: 100,000kPa
Filter	SMF-37-15	Maximum pressure: 99,000kPa Maximum Temperature: 60℃
Compressed air supply line	–	Diameter: 10mm
Vortex tube	Air-cooling vest V.1.0 (Kim et al., 2020)	Inlet pressure: 70,000kPa Air consumption: 220LPM Capacity: 100kcal/h
Cooling air supply line	Air-cooling vest V.2.0	Diameter: 8mm

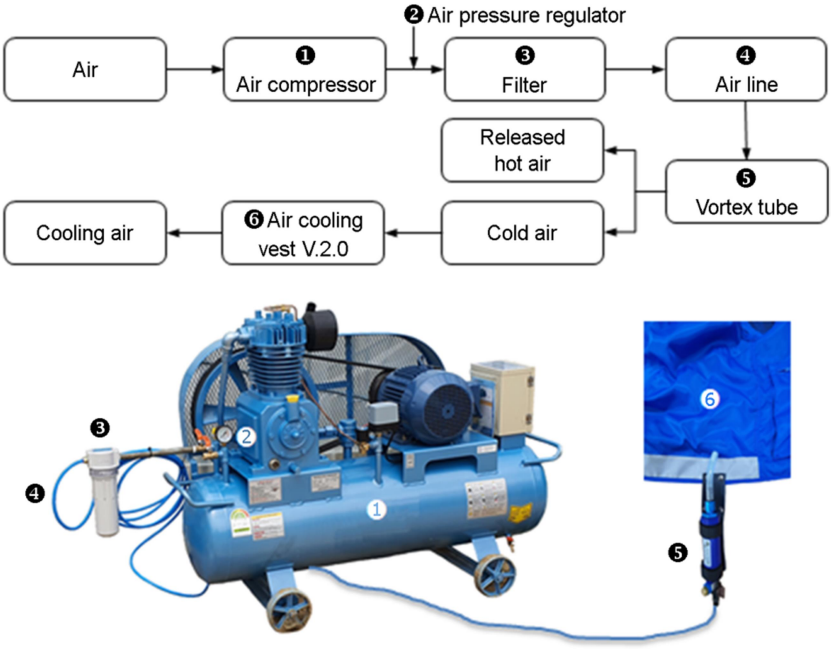


Figure 2. A diagram of an air cooling vest system using an air vortex tube

3. Evaluation of Field Applicability

3.1 Experimental farms and subjects

실험 대상 농가 선정을 위해 비닐하우스 시설 유형과 작물의 생육 형태를 고려하였다. 일반적으로 하우스 시설 재배 방식은 토경식와 고설식(양육식)으로 구분될 수 있고, 작물의 생육 형태는 저상형(예. 참외, 상추, 수박, 딸기 등)과 수직형(예. 고추, 멜론, 토마토 등)으로

구분될 수 있다. 이 연구에서는 재배 시설 유형과 작물 생육 특성에 따른 주요 농작업 행태를 반영하기 위해 토경식이면서 수직형인 토마토, 토경식이면서 저상형인 상추, 고설식 재배 작물인 딸기 농가를 선정하였다. 토마토와 딸기 재배 시설의 경우에는 압축공기 공급 라인을 지상 이동형 방식을 적용하였고(Figure 3 (a), (c)), 상추 재배 시설의 경우는 천정 레일형 방식으로 설치하였다(Figure 3 (b)). 토마토와 상추는 단동 비닐하우스 시설로 폭 7m × 길이 90m이고, 환기는 측면 하단부의 측창을 열고 닫는 방식이다. 딸기 재배 시설은 연동 비닐하우스 구조로 가로 90m × 세로 80m 규모로 환기는 측면 및 상부에 환기 팬(Fan)을 이용한 구조이다(Figure 3 (c)). 대상 농가의 주요 특징 및 작업은 Table 2와 같다.



(a) Tomato (b) Lettuce (c) Strawberry

Figure 3. Installation of air-cooling vest system in greenhouse farmhouse

Table 2. Characteristics of experimental target farms

Kind of crop	Type of greenhouse	Area (ha)	Ventilation conditions	Main task
Tomato	Soil cultivation	0.3967	Both sides opening of lower side	Pinching and harvesting
Lettuce	Soil cultivation	0.7934	Both sides opening of lower side	Harvesting
Strawberry	High bed system	0.4959	Both sides opening of upper side	Seedling and transplanting

에어냉각조끼(V.2.0)의 착용성 평가에 참여한 피실험자는 각 농가 마다 신체 건강한 성인 남자 4명이고, 피실험자들의 평균 신체 조건은 나이 30.6±2.9세, 신장 168.3±6.2cm, 체중 64.4±8.4kg, BMI (Body mass index)는 22.7±1.5이다. 피실험자는 기존의 서열 작업복, 에어냉각조끼(V.2.0)에 대하여 2회 실험을 수행하여 농가마다 16회로 총 48회의 데이터를 수집하였다. 기존의 작업복은 국내에서 시판되고 있는 농작업용 서열 작업복을 선정하였다. 기존의 서열 농작업복은 쿨링 소재 원단이 주로 사용되었고, 그 밖에 자외선 차단 등의 특징 있는 기능성 작업복이다. 그리고 기초 의복으로 동일한 러닝셔츠, 팬티, 양말, 운동화를 착용하도록 하였다. 그리고 사용 경험 만족도과 농업 현장 적합성 평가는 다수 사용자의 의견을 수렴하기 위하여 에어냉각조끼 시스템을 충분히 경험한 농업인을 대상으로 에어냉각조끼, 시스템 장치, 운용 관리 등 농업 활동하면서 경험한 내용을 설문 응답과 함께 인터뷰를 진행하였다. 이 조사는 토마토(3명), 상추(3명), 딸기(4명) 재배에 종사하는 농업인 10명을 대상으로 조사하였다. 이들의 평균 나이는 51±6.0세이고, 평균 종사 기간은 평균 11.6±2.9년이다.

3.2 Measurement and methods

실험은 에어냉각조끼(V.2.0)에 대한 효과 차이를 비교하기 위하여 총 80분 동안 실시하였다. 실험 프로토콜은 안정기(Stability) 20분, 휴식기(Rest) 10분, 작업기(Working) 30분, 회복기(Recovery) 20분으로 구성하였고, 안정기 이후 60분(휴식기-작업기-회복기) 동안의 데이터를 수집하였다. 실험 직무(Task)는 주요 작업(토마토: 순치기 및 수확, 상추: 수확, 딸기: 정식 및 이식)을 수행하도록 하였다. Table 3는 인체생리반응 실험 및 주관적 착의 감각 평가에 대한 전체 진행 프로토콜을 보여준다.

Table 3. Experimental procedure and protocol

Total: 60min	20	10	30	20
Step / Item	Stability	Rest	Working	Recovery
Microclimates inside clothing	-	○	○	○
Subjective sensations	-	○	○	○

피실험자는 자발적 동의 하에 실험에 참여하도록 하였다. 실험에 앞서 실험의 목적, 방법, 주의사항을 인지하도록 하였고, 키와 체중을 측정, 그리고 인체생리반응 측정 센서를 부착하였다. 실험은 계획된 프로토콜에 따라 실시되었으며, 실험 전에 실험복 착용 후 체온 및 스트레스 변인을 최소화하기 위해 안정기 20분을 취하게 하였다. 휴식기는 10분으로 이때 보텍스 튜브 장치는 작동되지 않은 상태이며 편안하게 앉은 자세를 취하도록 하였다. 실험이 진행되는 동안 의복 내 온도와 습도는 60분 동안 연속적으로 측정되며, 주관적 착의 감각 측정을 위해 직무를 수행하는 동안 프로토콜 단계 마다 응답을 수집하였다. Figure 4는 각 실험 대상 농가에서의 실험 장면을 보여준다.



(a) Tomato (b) Lettuce (c) Strawberry

Figure 4. Experiment of working tasks

실험이 진행되는 동안 의복 내 온도와 습도 측정, 주관적 착의 감각 평가가 이루어졌고 일정기간 동안 에어냉각조끼를 사용한 이후 경험 만족도와 농업 현장 적합성을 평가하였다. 의복 내 온도와 습도는 의복 기후 온습도 측정기(TR-72wb, T&D, Japan)을 이용하여 3개(가슴, 등, 허리) 부위를 10초 간격으로 연속 측정하였다. 주관적 착의 감각으로 냉온감(쾌적감, 온열감, 습윤감) 및 피로도를 평가하

Table 4. Scale of subjective sensation

Scale	Comfort sensation	Thermal sensation	Humidity sensation	Fatigue sensation
1	Comfortable	Indifferent	Very dry	Neutral
2	Slightly uncomfortable	Slightly warm	Dry	Slightly fatigue
3	Uncomfortable	Warm	Slightly dry	Fatigue
4	Very uncomfortable	Hot	Neutral	Very fatigue
5		Very hot	Slightly humid	
6			Humid	
7			Very humid	

였다. 주관적 착의 감각 측정은 피실험자로 하여금 질문에 응답하도록 하였다. 주관적 착의 감각 평가 항목에서 쾌적감은 1~4점 척도, 온열감은 1~5점 척도(Kim et al., 2006), 습윤감은 정신물리학적 1~7점 척도를 사용하였고(ASHRAE, 2001), 피로감은 1~4점 척도(Jeon et al., 2014)로 평가하였다(Table 4).

사용 경험 만족도 항목은 목적 타당성 및 적절성을 위해 의류제품 관련 선행연구를 비교하여 적합한 항목을 추출하였다(Lee et al., 2011; Chae et al., 2009; Cho and Lee, 2008). 주요 평가 내용은 사용 용이성(4개 문항), 기능 유용성(3개 문항), 시스템 안전성(4개 문항), 농작업 활동성(3개 문항), 소재 및 디자인(4개 문항)으로 5개의 카테고리 총 18문항으로 구성하였다. 그리고 농업 현장 적합성 평가는 서열스트레스 예방 효과, 농작업 활동, 작물 재배 환경, 시스템 설치 및 관리 등 4가지 평가 항목으로 구성하였다. 사용 경험 만족도 및 농업 현장 적합성 평가 설문지 응답은 1점(매우 부정)~5점(매우 긍정)까지 5점 척도로 조사하였다.

3.3 Evaluation process

조사 시기는 여름철 고온 현상을 고려하여 6월 초부터 9월초까지 수행하였다. 우선 평가 대상 농가를 선정하였고, 선정된 농가에 에어냉각조끼를 사용할 수 있도록 공기압축기, 에어 공급 라인 등 시스템을 설치하였다. 실험은 딸기 작물은 6월 초순, 토마토 작물은 7월 초순, 상추 작물은 8월초에 수행하였으며 가능한 온도와 습도 변화가 적은 맑은 날씨 환경 조건에서 수행하였다. 착용성 평가 실험은 농작업 실제 상황을 반영하고, 피실험자의 안전을 고려하여 주로 작업하는 시간대인 오전 9:00-10:00시, 오후 5:00-6:00시에 수행하였고, 피실험자의 일주기 리듬(Circadian rhythms)의 변화를 최소화하기 위하여 동일 피실험자가 같은 시간대에 맞추었고, 실험 순서는 랜덤 수행하였다. 또한 에어냉각조끼 시스템에 대한 사용 경험 만족도 및 농업 현장 적합성 평가는 실험 대상 농가마다 사용 경험이 있는 농업인을 대상으로 조사하였다.

3.4 Data analysis

현장 실험에서 얻은 인체생리학적 반응 결과들에 대해 60분 노출 동안의 측정치, 주관적 착의 감각, 사용 경험 만족도 및 농업 현장 적합성 등의 데이터에 대하여 각각의 평균값(M)과 표준편차(SD)를 계산하였고, 유의한 항목에 대해 SPSS WIN 20의 통계패키지를 이용하여 ANOVA (Analysis of variance)와 Paired *t*-test로 차이를 검증하였다.

4. Result and Discussion of Field Applicability

4.1 Experimental environment

실험은 여름철 한낮의 직사광선 및 고열 환경을 피하여 수행하였다. 실내외 온습도 측정은 데이터 로거(TR-72wb, T&D, Japan)를 이용하였고, 비닐하우스 가운데 지점을 기준으로 굽힌팔꿈치 높이(여성 5분위)를 고려한 90cm 높이에서 측정하였다(KATS, 2018). 실험을 진행하는 동안 각 작물 별 비닐하우스 내외 평균 기온과 습도 측정 결과, 토마토 작목은 실내 35.2℃, 47.4%RH, 실외 31.1℃, 55.9%RH로 나타났고, 상추 작목의 경우에는 실내 34.4℃, 60.4%RH, 실외 30.4℃, 71.9%RH를 보였다. 그리고 딸기 작목은 실내 35.5℃, 54.9%RH, 실외 35.4℃, 56.8%RH로 측정되었다. 모든 작물의 온도는 실내가 실외보다 높았고, 습도의 경우에는 실외가 실내보다 높게 나타났다. 일반적으로 비닐하우스 내가 실외보다 덥고 습하나(Choi et al., 2002), 이 연구에서는 실험을 수행하는 동안 장마철로 인하여 외부의 습도가 내부보다 상대적으로 높게 나타난 것으로 판단된다. Table 5는 실험이 진행되는 동안 측정된 작물 별 실내외 평균 온도와 습도 측정치를 보여준다.

Table 5. Physical environment inside and outside the greenhouse during experiment

Kind of crop	Temperature & humidity		Mean	SD	Max.	Min.
Tomato	Indoor	Air temperature (℃)	35.2	0.5	36.3	33.9
		Air humidity (%RH)	47.4	1.2	50.0	45.0

Table 5. Physical environment inside and outside the greenhouse during experiment (Continued)

Kind of crop	Temperature & humidity		Mean	SD	Max.	Min.
Tomato	Outdoor	Air temperature (℃)	31.1	0.4	32.0	30.1
		Air humidity (%RH)	55.8	0.9	57.0	54.
Lettuce	Indoor	Air temperature (℃)	35.5	0.6	36.8	34.6
		Air humidity (%RH)	54.9	1.2	57.0	52.0
	Outdoor	Air temperature (℃)	35.4	0.4	36.3	34.5
		Air humidity (%RH)	56.8	1.1	59.0	54.0
Strawberry	Indoor	Air temperature (℃)	31.7	0.4	34.9	31.0
		Air humidity (%RH)	61.4	2.0	63.7	49.7
	Outdoor	Air temperature (℃)	29.6	0.4	32.1	28.7
		Air humidity (%RH)	64.6	2.0	66.8	51.8

4.2 Microclimate in clothing

실험이 진행되는 동안 3가지 작목에 대한 착용복에 따른 의복 내 온도와 습도 전체 평균 측정 결과, 온도의 경우 기존 작업복이 35.3±1.8℃, 개발 작업복은 31.1±2.1℃를 보였고(p< .0001), 습도는 기존 작업복이 74.7±5.7%RH, 개발 작업복이 60.5±11.4%RH로 나타나 개발 작업복이 온습도 모두 낮은 것으로 분석되었다(p< .0001). 실험 직무 단계 별 작업복 간의 평균 온습도 차이를 보면 휴식기에서는 온습도 모두 유의미한 차이가 없었으나 작업기에서는 온도(기존 작업복: 34.6±1.8℃, 개발 작업복: 30.8±3.0℃) (p< .001)와 습도(기존 작업복: 76.5±8.4%RH, 개발 작업복: 58.2±10.9%RH) (p< .0001) 모두 유의미한 차이가 있었고, 회복기에서도 작업복 간의 온도(기존 작업

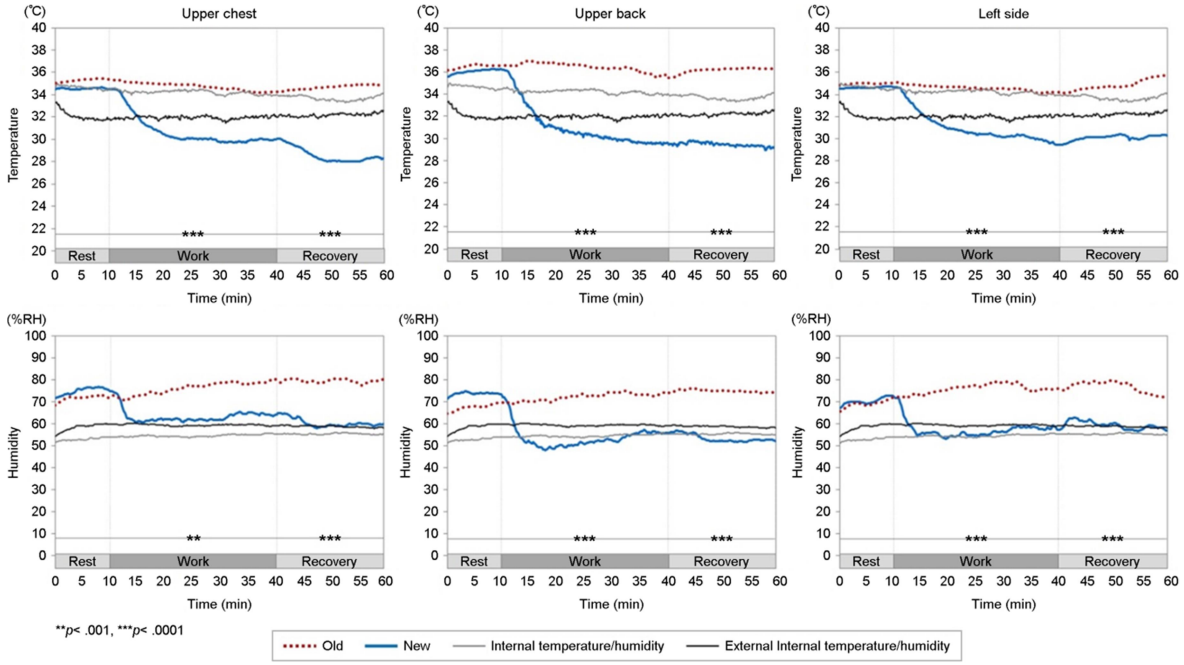


Figure 5. Clothing microclimate temperature and humidity during 60 min in greenhouse

복: 35.2±1.8℃, 개발 작업복: 30.2±3.7℃) (p< .0001)와 습도(기존 작업복: 75.5±10.9%RH, 개발 작업복: 58.2±13.2%RH) (p< .0001) 모두 유의미한 차이를 보였다. 그리고 실험 직무 단계에 작업복 별 평균 온습도에 ANOVA 분석 결과, 기존 작업복 온도의 경우에는 유의미한 차이가 없었고, 습도는 직무 단계 별 유의미한 차이를 보였다(p< .05). 습도에 대한 사후분석 결과에서 휴식기, 작업기, 회복기는 각각 69.3±7.8%RH, 76.5±8.4%RH, 75.5±10.9%RH로 휴식기는 작업기(p< .05)와 회복기(p< .05)에 유의미한 차이를 보였다. 개발 작업복은 온도와 습도 모두 유의미한 차이를 보였다(p< .0001). 사후분석 결과, 온도의 경우 휴식기(34.6±1.6℃)는 작업기(30.8±3.0℃) (p< .001)와 회복기(30.2±3.7℃) (p< .0001)에 유의미한 차이를 보였고, 작업기와 휴식기에서는 유의미한 차이를 보이지 않았다. 습도의 경우에도 휴식기(70.4±9.0%RH)는 작업기(58.2±10.9%RH) (p< .001)와 회복기(58.2±13.3%RH) (p< .001)에 유의미한 차이를 보였고 작업기와 회복기는 유의미한 차이가 없는 것으로 나타났다. 3가지 신체 부위 별 평균 온습도 비교 결과, 가슴 부위는 기존 작업복의 경우 온도가 34.8±1.5℃, 습도는 76.6±4.5%RH, 개발 작업복의 경우에는 온도가 30.7±2.0℃, 습도가 64.4±10.2%RH으로 온도(p< .0001)와 습도(p< .001) 모두 유의미한 차이를 보였다. 등 부위의 경우에는 기존 작업복은 온습도가 36.4±1.6℃, 72.4±5.1%RH이고, 개발 작업복은 온습도가 31.4±1.7℃ (p< .0001), 57.0±13.1%RH (p< .0001)로 나타나 온습도 모두 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다. 그리고 허리 부위의 온습도는 기존 작업복이 34.7±1.7℃, 75.1±6.9%RH이고, 개발 작업복이 31.3±2.9℃, 60.2±10.1%RH로 온도(p< .001)와 습도(p< .0001) 모두 유의미한 차이를 보였다(p< .0001). Figure 5는 실험이 진행하는 동안 두 실험복의 의복 내 온습도 평균 변화량을 보여준다. 휴식기에서의 온습도는 두 실험복 모두 가슴, 등, 허리 부위에서 조금 상승하는 경향이 있었다. 작업기 동안에 기존 작업복 착용 시 온도는 휴식기와 유사한 수준을 유지하는 경향을 보였고, 습도의 경우에는 시간이 지날수록 상승하였다. 개발 작업복의 경우는 휴식기 이후 작업기에 들어서서 온도와 습도 모두 급격하게 감소하는 경향을 보였고, 회복기 동안에는 온도와 습도가 작업기 수준을 유지되는 있는 추세를 보였다.

Table 6는 실험이 진행되는 동안 재배 작물(토마토, 상추, 딸기) 작업 중 에어냉각조끼(V.2.0)의 의복 내 온습도 측정값을 보여준다. 토마토 작물은 전체 의복 내 평균 온도와 습도 분석 결과, 기존 작업복(온도: 35.3±1.4℃, 습도: 78.3±5.7%RH)이 개발 작업복(온도: 32.2±1.1℃, 습도: 66.9±8.6%RH)이 보다 높게 나타났고(p< .0001), 가슴, 등, 허리 부위의 온도와 습도 모두 유의미한 차이를 보였다. 직무 단계에 따른 작업복 간의 온습도 차이 분석 결과에서 작업기 동안에 온도(p< .0001)와 습도(p< .001)에 유의미한 차이를 보였고, 회복기 동안에도 온도와 습도에 유의미한 차이를 보였다(p< .001). 상추 작물의 경우는 전체 의복 내 평균 온습도 비교 결과에서 기존 작업복(온도: 36.0±1.1℃, 습도: 75.5±6.6%RH)이 개발 작업복(온도: 32.5±1.6℃, 습도: 64.9±8.4%RH) 보다 높은 측정치를 보였다(p < .0001).

Table 6. Microclimate measurement in clothing for tomato, lettuce and strawberry crops

Kind of crop	Body	Temperature (℃)			Humidity (%RH)		
		Old clothes	New clothes	*t*-value	Old clothes	New clothes	*t*-value
Tomato	Upper chest	34.5±1.1	31.3±2.4	3.285*	74.5±5.1	68.0±3.1	2.960*
	Upper back	36.8±1.1	31.3±1.0	17.289***	73.8±6.7	67.1±6.8	2.741*
	Left side	34.7±0.6	32.2±1.1	5.419*	73.2±6.3	66.9±8.6	5.188*
	Total	35.3±1.4	31.6±1.6	7.923***	73.8±5.7	67.3±6.2	4.621**
Lettuce	Upper chest	35.8±0.9	31.3±2.3	4.768*	76.3±5.1	71.5±5.8	6.520*
	Upper back	37.0±1.0	33.1±0.7	9.382**	71.6±5.5	59.5±9.7	3.763*
	Left side	35.3±0.4	33.2±0.7	6.142*	78.5±8.0	63.8±5.1	3.414*
	Total	36.0±1.1	32.5±1.6	8.245***	75.5±6.6	64.9±8.4	5.327***
Strawberry	Upper chest	34.2±2.2	29.4±0.5	5.048*	79.0±2.0	53.7±9.8	7.220**
	Upper back	35.3±2.1	29.7±1.2	4.328*	71.9±3.1	44.5±11.1	8.112**
	Left side	34.3±2.9	28.5±2.8	3.037*	73.8±6.1	50.0±7.2	5.053*
	Total	34.6±2.3	29.2±1.8	6.883***	74.9±4.9	49.4±9.7	11.855***

M ± SD, *p< .05, **p< .001, ***p< .0001

그리고 가슴, 등, 허리 신체 부위에서도 모두 유의미한 차이를 보였다. 직무 단계에서 두 작업복은 작업기와 회복기에서도 유의미한 차이를 보였다(p< .0001). 딸기 작물의 경우는 모든 신체 부위에서 온도와 습도는 유의미한 차이를 보였고, 전체 의복 내 온습도 평균 분석 결과에서 기존 작업복(온도: 34.6±2.3℃, 습도: 74.9±4.9%RH)이 개발 작업복(온도: 29.2±1.8℃, 습도: 49.4±9.7%RH) 보다 낮게 나타났다(p< .0001). 그리고 작업기와 회복기에 온도와 습도 모두 유의미한 차이를 보였다(p< .0001).

의복 내 온도와 습도 측정 결과로 볼 때, 개발된 에어냉각조끼를 착용할 경우 기존의 작업복 대비 전반적으로 낮은 온도와 습도를 보여 온열스트레스 저감 효과가 있는 것으로 판단된다. 직무 단계에 따른 분석 결과에서 기존의 작업복의 경우 휴식기 이후 작업기와 회복기에서 의복 내 온습도가 점차 상승하거나 유지 수준에 있는 반면, 개발 작업복을 착용할 경우에는 휴식기 이후 작업기와 회복기에 기존 작업복 대비 낮은 온도와 습도를 유지하고 있음을 파악할 수 있었다. 재배 작물 별 의복 내 온습도 차이분석 결과에서도 모든 작물에서 개발 작업복이 기존 작업복 대비 낮은 온습도를 보여 서열스트레스 저감에 효과가 있었고, 직무에 따라 차이분석 결과에서 기존의 작업복의 경우 휴식기, 작업기, 회복기 단계에서 조금씩 상승하거나 유지하는 패턴을 보인 반면에 개발 작업복의 경우 초기 작업기 동안에는 휴식기 보다 낮은 온도와 습도를 유지하였고, 회복기에서도 저감된 상태의 온도를 지속하여 유지하는 것으로 나타났다. 기존의 Kim et al. (2020)의 실험 연구의 실험 환경(온도: 30±5.0℃, 습도: 70±5.0%RH)에서 기존 작업복 대비 온도 2.6℃, 습도 27.2%RH 저감 효과를 보였다. 이 연구에서는 3작목의 온실 내부 평균 온도 34±0.4℃, 평균 습도 55±1.0%RH)에서 의복 내 평균 온도는 4.2℃, 평균 습도는 14.2%RH 낮추는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과는 농작업 현장에서 에어냉각조끼(V.2.0) 착용 시 서열스트레스 저감에 효과가 있는 것으로 판단된다.

4.3 Subjective wear sensation and fatigue

Figure 6는 기존 작업복과 개발 작업복 착용 시 전체적으로 느끼는 주관적 온열감, 습윤감, 쾌적감, 피로도 분석 결과를 보여준다. 온열감의 경우 피험자들은 개발된 에어냉각조끼을 착용하였을 때 기존의 작업복 대비 작업기 및 회복기에 보다 시원하다고 응답하였다

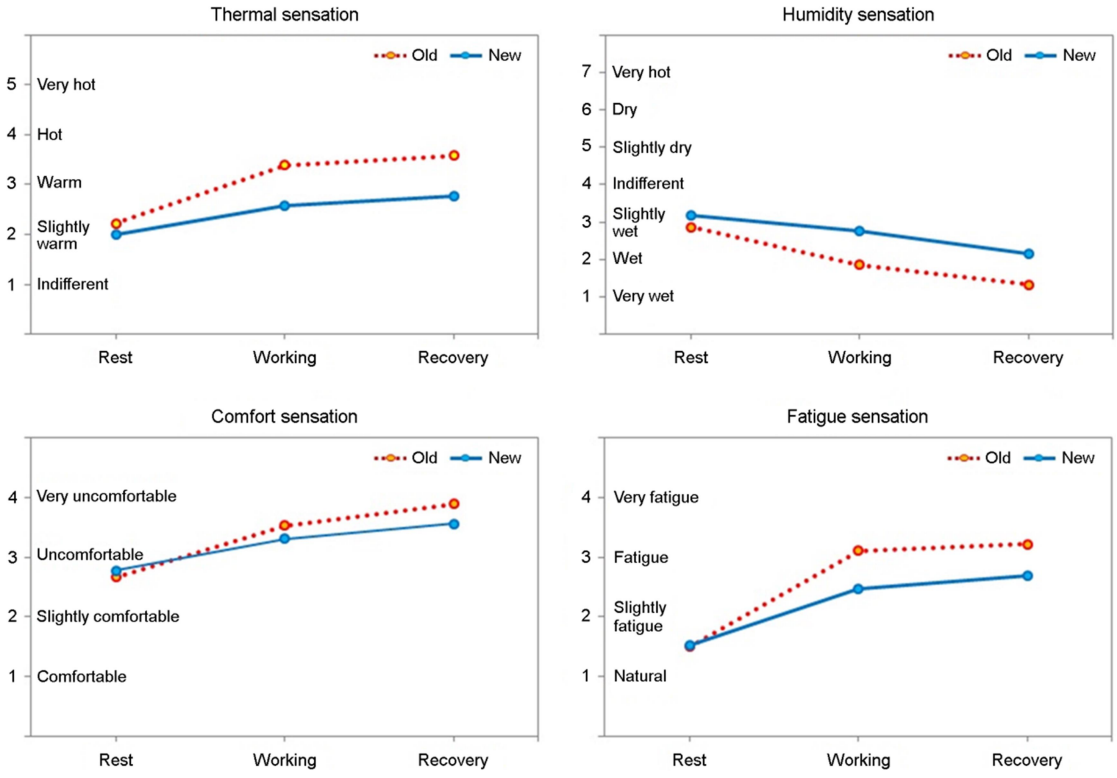


Figure 6. Subjective sensation during the experiment with old and new working clothes

($p< .0001$). 회복기 이후에서 기존의 작업복의 경우 매우 더움은 3.6±0.5 수준을 보인 반면에 개발 작업복은 점수가 2.8±0.5으로 조금 시원한 수준을 보여 두 의복 간 상당한 온열감 차이가 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 온열감은 비닐하우스 작업 전의 휴식기 동안 작업자의 의복 내부 온도와 작업기 동안 저감되는 온도 차이와 일치한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 습윤감은 기존 작업복의 경우 작업기에 1.9±0.8, 회복기는 1.3±0.5, 개발 작업복은 작업기에서 2.8±0.6, 회복기에서 2.1±0.6으로 기존 작업복 보다 낮은 온열감을 느끼고 있는 것으로 조사되었다($p< .0001$). 습윤감 항목의 경우에도 작업복간 점수 차이가 있는 것으로 보아 의복 내 습도 차이와 일치한 결과를 보였다. 반면에 기존의 작업복의 경우 의복내의 고온과 발한으로 인한 습기가 많고, 환기가 잘 되지 않아 작업하는 시간 동안 주관적으로 불쾌하고, 답답한 느낌을 받고 있는 것으로 판단된다. 쾌적감의 경우 피실험자들은 개발 작업복 착용 시 작업기와 회복기에서 기존 작업복 착용 시보다 더 쾌적감을 높게 느끼는 것으로 나타났다. 특히 회복기 이후 개발 작업복은 3.6±0.6으로 기존 작업복은 3.9±0.3을 보여 에어냉각조끼를 착용할 경우 인체에 쾌적성을 주고 있음을 알 수 있다. 또한 쾌적감은 작업기($p< .05$) 및 회복기($p< .001$) 전·후 모두 통계적으로 유의미한 것으로 나타났다. 그리고 피로도의 경우 기존의 작업복의 경우 작업기는 3.1±0.8점, 회복기는 3.2±0.4점으로 높은 피로감이 있었고, 개발 작업복은 작업기는 2.5±0.6으로 나타났고, 회복기는 2.7±0.5점으로 직무로 인한 약간의 피로감이 발생하는 것으로 나타났다($p< .0001$). 이상의 결과에서, 기존의 작업복의 경우 비닐하우스와 같이 고온 다습한 환경에 장시간 노출될 경우 건강장애를 초래할 위험이 있는 것으로 보이며, 개발된 에어냉각조끼를 착용하였을 경우 작업 시에 발생하는 서열부담을 기존 작업복을 착용할 경우보다 서열 부담을 줄일 수 있음이 시사되었다.

4.4 User experience and suitability for agricultural sites

Table 7은 에어냉각조끼 사용 경험 만족도 평가로 사용 용이성, 기능 유용성, 시스템 안전성, 작업 활동성, 소재 및 디자인 측면에 대한 응답 결과를 보여준다. 전반적으로 4.2±0.8로 대체로 사용 경험에 만족하는 수준을 보였고, 작목에 따른 평균 만족도 차이는 딸기(4.3±0.7)가 가장 높았고, 토마토(4.2±0.7점), 상추 작목(4.0±0.9) 순으로 나타났다. 사용 경험 만족도 카테고리 별로 보면, 사용 용이성 측면에서 4가지 항목(제품 조작 및 작동, 보텍스 튜브 카플러 탈부착, 조끼의 세탁 및 관리, 착용 시 무게감)에 대한 평가 결과 평균 4.3±0.7을 보여 에어냉각조끼를 조작, 관리, 착용 시 불편함이 없는 것으로 나타났다. 평가 항목 별로 보면 대부분 4.0 이상으로 만족하는 수준을 보였고, 조끼 착용 시 무게감은 다른 항목 대비 다소 낮은 3.5±0.5로 조금 낮게 평가되었다. 이와 같은 이유는 토마토 및 딸기 작목의 경우 보텍스 튜브 장치와 연결된 지상 이동형 압축공기 공급 라인을 30~40m 이상 끌고 다닐 경우 어느 정도 무게감을 느끼는 것으로 조사되었다. 기능 유용성 측면(작업 효율성, 건강관리 효과성, 서열스트레스 저감 욕구 충족)은 전반적으로 4.6±0.6으로 모든 작목에서 4.0 이상으로 만족하는 것으로 평가되었다. 특히 조끼를 착용했을 경우 작업 효율성 및 건강관리 효과성은 4.5 이상으로 매우 높아 에어냉각조끼를 착용했을 경우 서열스트레스 저감에 많은 효과가 있는 것으로 나타났다. 시스템 안전성 측면의 경우 에어냉각조끼 착용 시 안정감, 인체 영향, 위험성, 시스템 안전성 등 4개 항목을 평가한 결과 평균 3.8±0.6으로 어느 정도 만족하는 수준을 보였다. 시스템 안전성에 대한 인터뷰 결과 냉각공기가 인체에 미치는 영향은 거의 안전하다고 생각하고 있었으나 토마토 작목의 경우 딸기 및 상추 다른 작목과 달리 순치기 및 수확 작업 시에 신체의 상하 움직임이 많아 허리 측면에 부착된 보텍스 튜브 장치의 따듯한 공기 배출부와 신체적 접촉으로 인한 거부감이 있는 것으로 조사되었다. 또한 초기 사용 시 에어냉각조끼를 착용 시에 배출되는 소음에 대한 거부감이 있었으나 어느 정도 적응 후에는 거부감이 다소 감소하였다. 에어냉각조끼를 착용한 후 농작업 활동성(조끼 착용 시 여유, 보텍스 튜브 부착 위치, 움직임 불편감)의 경우 평균 4.0±0.9점으로 만족하는 것으로 평가되었다. 상추 작물의 경우 다른 작물 대비 낮게 평가되었다. 상추 작물의 경우 압축공기 공급 라인과 보텍스 튜브 장치의 결합부가 'U'자 형태로 연결되어 앉은 자세에서 작업 시에 작물 접촉 등으로 작업에 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 따라서 천정 레일형 압축공기 공급 라인을 제공할 경우 보텍스 튜브 부착 위치 및 연결 부위에 대한 개선이 필요할 것으로 판단된다. 그리고 소재 및 디자인 측면(소재 만족도, 조끼 착용 시 어울림, 외관 디자인)에 대한 만족도 결과 전반적으로 평균 4.4±0.7로 대부분의 작목에서 어느 정도 만족을 느끼고 있었다.

Table 7. Evaluation of satisfaction with use of air-cooling vests (N=10)

Category	Item	Tomato		Lettuce		Strawberry		Total	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Use easiness	Convenient to use and operate the product	4.6	0.5	4.8	0.4	4.4	0.5	4.6	0.5

Table 7. Evaluation of satisfaction with use of air-cooling vests (N=10) (Continued)

Category	Item	Tomato		Lettuce		Strawberry		Total	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Use easiness	Easy to detach and attach the vortex tube	3.8	0.8	3.8	0.4	4.4	0.5	4.0	0.7
	Designed to be easy to wash and manage the vest	4.6	0.5	5.0	0.0	4.6	0.5	4.7	0.5
	There is no weight sense in wearing the vest	3.4	0.5	3.4	0.5	3.8	0.4	3.5	0.5
Functional usefulness	More efficient to work than when not wearing the vest	4.8	0.4	4.8	0.4	4.8	0.4	4.8	0.4
	Thought to be effective to manage health	4.6	0.5	5.0	0.0	5.0	0.0	4.9	0.4
	Satisfied in desire with reduction of thermal stress	4.0	0.7	4.0	0.7	4.2	0.8	4.1	0.7
System safety	Not feeling tension when wearing the vest	3.8	0.4	3.2	0.4	3.6	0.5	3.5	0.5
	Thought that the effect of cooling air on human body is safe	3.8	0.8	3.8	0.8	4.4	0.5	4.0	0.8
	The warm air discharged from the device is not dangerous	3.6	0.5	4.0	0.0	4.0	0.7	3.9	0.5
	Thought that the system configuration has safety	4.0	0.7	3.4	0.5	4.0	0.7	3.8	0.7
Work activity	There is proper space in wearing the vest	4.6	0.5	3.6	0.5	4.4	0.5	4.2	0.7
	The attachment position of the vortex tube is proper	4.8	0.4	2.4	0.5	4.6	0.5	3.9	1.2
	There is no inconvenience due to the vortex tube device	4.4	0.5	3.0	0.7	4.2	0.4	3.9	0.8
Material and design	Satisfied with the material of the vest	3.6	0.5	4.0	0.7	3.6	0.9	3.7	0.7
	Not feeling awkward when wearing the vest	4.8	0.4	4.6	0.9	4.8	0.4	4.7	0.6
	Satisfied with the overall appearance of the vest	4.6	0.5	4.8	0.4	4.4	0.5	4.6	0.5
Total		4.2	0.7	4.0	0.9	4.3	0.7	4.2	0.8

농작업 적합성 평가는 서열스트레스 저감 효율성, 농작업 활동, 작물 재배 환경, 비닐하우스 시설 설치 및 관리 등의 4가지 항목에 대하여 수행하였다. 먼저 에어냉각조끼에 대한 서열스트레스 저감을 위한 도구로써 활용성 가능성은 4.5으로 매우 높은 점수를 보여 개발된 에어냉각조끼가 고온 다습한 환경에서 서열스트레스 저감에 만족하고 있는 것으로 나타났다. 작목 재배 시 에어냉각조끼 착용으로 인한 농작업 활동에 방해되는지에 대한 조사 결과 토마토와 딸기의 경우 4.0 이상으로 나타나 농작업 활동에 지장이 없었으나 상추 작물의 경우 2.6으로 낮게 나타났다. 이와 같은 이유는 수직 생육 작목인 토마토와 고설 재배 작목인 딸기의 경우 압축공기 공급

라인은 지상 이동형 방식에 적합한 것으로 보인 반면, 저상 생육이면서 저상 재배인 상추의 경우 압축공기 공급 라인과 작물이 접촉하는 경우가 있어 주의가 요구되었다. 따라서 레일식 압축공기 공급 라인의 경우 보텍스 튜브 장치와의 결합 부위에 대한 개선이 필요한 것으로 나타났다. 농작물 재배 환경에 미치는 영향에 대해서는 평균 4.3으로 거의 문제가 없었다. 이와 같은 이유는 공기를 활용한 장치로 환경오염이 없고, 보텍스 튜브 장치에서 배출되는 냉각공기와 따듯한 공기가 온실 내 열균형을 유지하여 작물 생육에 문제가 없는 장점이 원인인 것으로 응답하였다. 끝으로 에어냉각조끼 시스템과 관련하여 비닐하우스 시설 환경에 공기압축기(콤프레셔), 에어 공급 라인 설치 등 에어냉각조끼 시스템 설치 및 이에 대한 용이성에 대한 응답 결과 평균 4.7으로 매우 높은 점수를 보였다. 이와 같은 결과는 비닐하우스 시설에 에어냉각조끼 시스템 설치 및 관리에 적합한 것으로 판단된다. Table 8은 에어냉각조끼 시스템의 농업 현장 적용 적합성 조사 결과를 보여주고 있다.

Table 8. Evaluation of satisfaction with use of air-cooling vests (N=10)

Item	Tomato		Lettuce		Strawberry		Total	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Possible to be used as an efficient tool in reduction of thermal stress in summer	4.8	0.4	4.2	0.4	4.6	0.5	4.5	0.5
Not obstructing work action in cultivating crops	4.0	0.7	2.6	0.5	4.8	0.4	3.8	1.1
Applicable to the crops cultivation environment without problems	3.8	0.4	4.6	0.5	4.6	0.5	4.3	0.6
Easy to install and manage in the vinyl greenhouse facility environment	4.8	0.4	4.8	0.4	4.4	0.9	4.7	0.6
Total	4.4	0.7	4.1	1.0	4.6	0.6	4.3	0.8

5. Conclusion

이 연구에서는 보텍스 튜브 기술을 적용한 농업용 에어냉각조끼 개발 및 현장 실증 연구를 수행하였다. 비닐하우스 재배 농가를 대상으로 평가한 결과, 의복 내 온습도 측정 결과 기존의 서열 작업복 보다 개발된 에어냉각조끼(V.2.0)를 착용할 경우 의복 내 전체 평균 온도는 11.9%, 습도 19.0% 감소율을 보여 온열스트레스 저감 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 또한 개발 작업복을 착용할 경우 작업 수행 이후 회복 시에도 기존 작업복 보다 온도와 습도 저감에 유의미한 효과가 있었다. 그리고 주관적 착의 감각 효과에서도 서열 부담이 기존 작업복 대비 낮게 나타나 보다 긍정적인 반응을 얻을 수 있었고. 사용 경험 만족도와 농업 현장 적용 적합성 평가에도 전반적으로 만족하는 수준을 보였다. 이러한 연구 결과는 보텍스 튜브를 적용한 에어냉각조끼가 실제 농작업 현장에서 서열스트레스 저감을 위한 효율적 보호복으로 적용이 가능할 것으로 기대된다. 이 연구의 사용 경험 평가 결과에서 도출된 저상형 압축공기 공급 라인 방식에서의 이동 시에 느끼는 무게감, 레일식 압축공기 공급 방식에서 보텍스 튜브와 공급에어라인 연결 편이성, 보텍스 튜브 장치의 배출부(따듯한 공기) 위치, 보텍스 튜브 장치의 소음 저감 등에 대한 개선은 필요할 것으로 보인다. 향후 에어냉각조끼의 사용성 개선과 다양한 농작업 환경에 적용할 수 있는 범용적 가이드라인 개발, 농작업 현장 보급을 실용화 연구가 진행되어야 될 것이다.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ01487605)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

ASHRAE, ASHRAE Standard 55-1992-Thermal Environment Conditions for Human Occupancy, *American Society of Heating,*

Refrigerating and Air-conditiong Engineers, INC. 2001.

Chae, J.M., Cho, H.S. and Lee, J.H., A Study on Consumer Acceptance toward Commercialized Smart Clothing, *Science of Emotion and Sensibility*, 12(2), 181-192, 2009.

Cho, H.K. and Lee, J.H., The Development of Usability Evaluation Criterion for Sensor based Smart Clothing, *Journal of the Korean Society for Clothing Industry*, 10(4), 473-478, 2008.

Choi, H.K., Yoo, G.J. and Lim, Y.S., Inflow Nozzle Conditions for Improving Vortex Tube Performance, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 17(2), 68-76, 2018.

Choi, J.W. and Baik, Y.J., UV Ray Protective Function and Wear Sensation of Garment for Plastichouse Worker, *The Korean Journal of Community Living Science*, 6(1), 25-30, 1995.

Choi, J.W. and Hwang, K.S., Effectiveness of Clothing Vest in Hot Environment, *Journal of the Korea Society of Clothing and Textiles*, 25(1), 83-90, 2001.

Choi, J.W. and Seol, H., Study on Skin Cold Spot Distributions of Korea Adult. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 23(5), 667-671, 1999.

Choi, J.W., Kim, M.J. and Lee, J.Y., Efficacy of Cooling Vests for Alleviating Heat Strain of Farm Workers in Summer, *Journal of the Korea Society of Clothing and Textiles*, 29(8), 1176-1187, 2005.

Choi, J.W., Kim, M.J. and Lee, J.Y., Evaluation of the Farmers' Workload and Thermal Environments during Cucumber Harvest in the Greenhouse, *The Korean Journal of Community Living Science*, 9(3), 245-253, 2002.

Choi, M.S. and Ashdown, S.P., The design and Testing of Work Clothing for Female Pear Farmers, *Clothing and Textiles Research Journal*, 20(4), 253-263, 2002.

Hwang, K.S., Kim, D.H. and Seon, C.H., Development of Functional Fatigue Clothes for Plastic Greenhouse Workers, *The Korean Journal of Community Living Science*, 21(4), 551-558, 2010.

Jeon, E.J., Park, S.K., You, H.C. and Kim, H.E., Wearing Comfort Evaluation of Summer Flight Suit to Improve the Ventilation, *Fashion and Textile Research Journal*, 16(3), 1-7, 2014.

Jung, J.Y., Kang, J., Seol, S. and Lee, J.Y., Development Liquid Cooling Garments to Alleviate Heat Strain of Workers in Summer and Exploring Effective Cooling Temperature and Body Regions, *Fashion and Textile Research Journal*, 22(2), 250-260, 2020.

Jung, Y., Chae, Y. and Kim, E., Development of Cooling Garment for Extremely Hot Environment Using a Peltier Device and its Comfort Properties, *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 36(1), 1-11, 2012.

KATS (Korea Agency for Technology and Standards), Hand-related universal product design guidelines using human body information, 2018.

KCDC (Korea Centers for Disease Control and Prevention), 2016~2020's hot temperature patient exceeded last year's occurrence

and advised to take care during the holiday season, 2020, https://kdca.go.kr/board/board.es?mid=a20304010600&bid=0004&&cg_code=C01 (retrieved August 2, 2021).

Kim, D., Chung, J., Lee, J. and Lee, J., Characteristics of Heat wave Mortality in Korea. *Korean Meteorological Society*, 24(2), 225-234, 2014.

Kim, H.E., Yeon, S.M., Jeong, J.R. and Lee, M.J., Ergonomic Evaluation of Functional Working-Clothes-focused on Flame-Proof Clothing, *Journal of the Korean Society for Clothing Industry*, 8(5), 597-603, 2006.

Kim, I., Kim, K., Kim, H.C., Seo, M.T., Kim, K. and Ko, M., A Study on an ICT-based System for Safe Management of Agricultural Facilities for Farmers' Safety Activities, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 37(4), 489-502, 2018a.

Kim, I., Kim, K., Seo, M.T., Park, S.I., Cha, J.J., Kim, H.C. and Kim, K., Development and Evaluation of a Cooling Vest Applied with Vortex Tubes to Reduce the Thermal Stress of Greenhouse Workers, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 39(1), 43-58, 2020.

Kim, S.W., Lee, T.H., Kim, S., Yang, H.S. and Chang, H.H., Development of a Small Ozone Water Making Device using an Air Vortex Tube, *Journal of Agriculture and Life Science*, 52(3), 145-151, 2018b.

Kim, R.J., Won, J., Lee, W.J., Choi, J. and Kim, S., Trend of Heat Wave Events in South Korea using Daily Minimum Air Temperature, *Journal of Wetlands Research*, 21(4), 344-353, 2019.

Kwon, O.K., Kim, J.A. and Kim, T.K., Efficacy of Cooling Vest for Auxiliary Body Cooling in Hot Environments (1) - Thermophysiological Response of Human Body in Local Cooling, *Journal of the Korean Society for Clothing Industry*, 2(3), 265-271, 2000a.

Kwon, O.K., Kim, T.K. and Kim, J.A., Efficacy of Cooling Vest for Auxiliary Body Cooling in Hot Environments (2) - Comparison in Terms of Thermophysiological Properties between New Cooling Vest and Standard Cooling Vest, *Journal of the Korean Society for Clothing Industry*, 2(4), 346-352, 2000b.

Lee, D.H., Kim, D.S., Chung, J.W., Lee, K. and Lim, H.S., Status and Awareness of Excessive Heat Exposure among Agricultural Workers, *Journal of Agricultural Medicine and Community Health*, 43(1), 9-17, 2018.

Lee, J.J., Yang, J.H. and Hwang, I.S., Farmers' Syndrome and its Risk Factors of Vinylhouse and Non-vinylhouse Farmers in Gyeonghuk Province Rural Area, *The Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 18(2), 146-155, 2006.

Lee, J.R., Paek, K.J. and Kim, G.Y., Development and Evaluation of Smart Jacket for Women aged Fifties and Sixties, *Journal of the Korean Society for Clothing Industry*, 13(6), 926-933, 2011.

MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural affairs), 2019, The Status of Greenhouse and Vegetable Production, Sejong-si, Korea (in Korean), https://www.mafra.go.kr/bbs/mafra/71/321668/artclView.do (retrieved August 2, 2021).

Myung, J.Y., Shim, H.S. and Choi, J.W., A Study on Development of Work Wear for the Plastic House Workers, *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 17(1), 19-35, 1993.

Oh, D.J. and Choi, J.W., An Experimental Study on the Energy Separation in the Ratio of Nozzle Area of a Low Pressure Vortex

Tube, *Journal of Energy Engineering*, 13(1), 34-39, 2004.

Roh, S., Work-related diseases of agricultural workers in South Korea, *Journal of the Korean Medical Association*, 55(11), 1063-1069, 2012.

Xue, Y., Arjomandi, M. and Kelso, R., A Critical Review of Temperature Separation in a Vortex Tube, Experimental *Thermal and Fluid (ETF) Science*, 34, 1367-1374, 2010.

Author listings

Insoo Kim: ergonomist@korea.kr
Highest degree: Ph.D., Department of Industrial Systems and Information Engineering, Korea University
Position title: Junior Researcher, Department of Agricultural Engineering, RDA
Areas of interest: Ergonomics, HCI

Sooin Park: sooinpark@korea.kr
Highest degree: B.S., Department of Electronic Engineering, Konkuk University
Position title: Junior Researcher, Department of Agricultural Engineering, RDA
Areas of interest: Electronic Engineering, Ergonomic Tools Design

Hye-Seon Chae: hyeseon@korea.kr
Highest degree: M.S., Department of Clothing and Fashion, Yeungnam University
Position title: Senior researcher, Department of Agricultural Engineering, RDA
Areas of interest: Occupational Safety and Health Management, National Statistics

Kyungran Kim: kimgr@korea.kr
Highest degree: Ph.D., Department of Textiles, Merchandising and Fashion Design, Seoul National University
Position title: Senior researcher, Department of Agricultural Engineering, RDA
Areas of interest: Occupational Safety and Health Management, Ergonomic Tools Design