

자외선과 원적색광을 포함한 복합광 조사에 따른 호라산 밀싹의 생육 및 생화학적 특성

박지윤¹, 카니베코바라캣², 배서현¹, 이성도³, 유승욱³, 한동엽^{4,5}, 김정실^{6,7*}

Growth and Biochemical Characteristics of Khorasan Wheat Sprouts under Combined Light Treatments Including Ultraviolet and Far-Red Radiation

Jiyun Park ¹, Rakhat Kanybekova ², Seohyun Bae ¹, Seong Do Lee ³, Seunguk Yu ³, Dongyup Hahn ^{4,5} and Jungsil Kim ^{6,7*}

¹경북대학교 응용생명과학부, ²경북대학교 식량안보 및 농업개발학과, ³경북대학교 식품공학부, ⁴경북대학교 첨단바이오융합학과, ⁵경북대학교 농생명융합공학과, ⁶경북대학교 스마트생물산업기계공학과, ⁷경북대학교 발농업기계개발연구센터

¹Dept. of Applied Bioscience, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea, ²Dept. of Food Security and Agricultural Development, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea, ³School of Food Science and Biotechnology, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea, ⁴Dept. of Advanced Bioconvergence, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea, ⁵Dept. of Integrative Biotechnology, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea, ⁶Dept. of Smart Bio-Industrial Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea, ⁷Upland Field Machinery Research Center, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

* Correspondence: jungsil.kim@knu.ac.kr

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.30>

Agric. Environ. Sci. 2025, 44, 287-298

Received: July 24, 2025

Revised: July 31, 2025

Accepted: August 25, 2025

Published: August 29, 2025

Online ISSN: 1233-4173

Print ISSN: 1225-3537



© The Korean Society of Environmental Agriculture 2025



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://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.

Abstract: With growing interest in extending light spectra beyond the visible range to improve crop yield and quality, this study investigated the effects of combined light treatments, comprising multiple wavelengths including ultraviolet-A and far-red, on the germination and sprout growth of Khorasan wheat under controlled conditions. Growth and biochemical parameters, including stem and root development, total polyphenol content, and antioxidant activity, were assessed relative to a white light control in the laboratory condition. The combined light treatments significantly enhanced morphological characteristics such as stem diameter, root length, fresh weight, and leaf dry weight compared with white light. However, both total polyphenol content and antioxidant activity showed a decreasing tendency, suggesting a potential inverse relationship between morphological enhancement and antioxidant responses. Moreover, two combined light regimes with different ultraviolet-A and far-red levels displayed similar overall trends, though the magnitude of plant responses varied. These findings indicate that while combined light can promote specific growth characteristics, it may simultaneously suppress antioxidant capacity. The results provide a valuable basis for designing light management strategies to optimize Khorasan wheat sprout production in plant factory systems.

Keywords: Antioxidant activity, Far-red light, Khorasan wheat, Sprout growth, Ultraviolet-A light

서 론

최근 팬데믹 이후 형성된 자기 주도 건강관리 경향으로 인해 건강에 대한 인식이 높아지고, 개인 맞춤형 건강 분석이 가능해지면서 건강 기능성 성분을 함유한 식품 섭취에 대한 관심이 증가하였다[1]. 뿐만 아니라 고령 인구의 증가로 인해 만성 질환의 예방을 위한 영양 및 식이 전략의 중요성 또한 대두되고 있는 가운데[2,3], 기본 영양 이상의 건강 강화 또는 질병 예방을 목적으로 하는 특정 성분이 포함된 다양한 기능성 식품 개발이 주목받고 있다[4].

전곡 작물로 전 세계적으로 가장 널리 재배되고 있는 밀은 밀기울 혹은 통곡물로 섭취 시 심혈관 질환, 당뇨병, 암 등의 만성질환 예방에 긍정적인 효과가 있는 것으로 보고되었다[5]. 이는 이들이 함유하고 있는 화합물에 기인한 것으로 알려져 있다. 특히, 밀은 다른 곡물에 비해 상대적으로 많은 양의 페놀산을 포함하고 있는데, 페놀산은 방향족 고리에 하이드록시기가 결합된 화학적 구조를 가진 식품의 2차 대사산물로서 항암, 항염증 등 다양한 생리활성을 나타낸다[6,7]. 그 중에서도 고대 밀 품종인 호라산 밀(Khorasan wheat, *Triticum turgidum* ssp. *turanicum*)은 일반 밀에 비해 단백질 함량이 높고, 미네랄 및 아미노산 함량이 풍부하며, 항염증 기능과 더불어 항산화 활성이 우수한 것으로 알려져 있다[8,9].

식물의 생육에 있어 빛, 수분, 산소는 필수적인 요소이며, 특히 빛은 식물의 생장과 생리적 반응에 중요한 영향을 미친다. 식물은 광합성을 위해서 적색광과 청색광이 포함된 400~700 nm 파장의 가시광선을 필요로 한다고 알려져 있지만, 최근에는 가시광선 범위보다 더 넓은 파장대인 자외선과 원적색광에 대한 관심이 높아지고 있다. 식물은 특정 파장의 빛에 민감하게 반응하는데, 자외선의 경우 광합성 대사 활동을 저해하여 식물의 생장에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있다. 자외선은 파장 범위에 따라 자외선 A(320~400 nm), 자외선 B(280~320 nm), 자외선 C(200~280 nm)로 분류되며, 파장이 짧을수록 에너지가 높고 생물학적 영향이 크다[10]. 자외선은 인간의 눈에 보이지는 않지만, 각종 요소들과 상호작용하여 전자를 활성화시키고 광화학 반응을 촉발할 수 있으며, 다양한 반응 과정을 촉진한다[11]. 식물이 적절한 정도의 자외선에 노출되면, 식물의 형태, 색상, 수확 시기 등 다양한 생산 요소가 개선되거나 해충 및 질병에 저항성이 생기는 등 긍정적인 효과를 나타내기도 한다. 실제로 밀의 유묘에 자외선 B를 조사한 결과, 총 페놀 함량이 유의미하게 증가하고 항산화 활성이 향상되었다는 보고가 있다[12].

한편, 원적색광은 700~750 nm 파장 영역에 속하며, 식물의 대사와 생합성 활동을 증진시켜 씨앗의 발아와 관련된 에너지 잠재력을 높인다. Wang et al. [13]은 원적색광에 노출된 식물이 광합성 기작의 일환인 전자전달계 내 전자 전달 속도의 증가 등 생장 측면에서 높은 효율을 나타낸다고 보고하였다. 또한, 할로겐 램프나 발광 다이오드(LED)에 일정량의 원적색광을 추가하여 복합 광원이 식물을 태양광 아래서 자란 것과 유사한 성장 양상을 유도할 수 있음을 확인하였다[14]. 따라서 복합 광원을 이용한 실험에서 원적색광을 추가하는 것은 식물의 생장 과정에서 기능성 물질의 축적을 위한 중요한 전략이 될 수 있다.

다양한 광질의 조합은 식물의 잎 면적 확대, 항산화 활성 증진, 생장 촉진에 긍정적인 영향을 미치고[15,16], 이 중 자외선 A와 원적색광의 복합 처리 조건은 특히 지상부 생장과 기능성 향상 측면에서 효과적인 반응을 유도한다[17-19]. 이처럼 식물의 광 수용체 및 광 신호전달 기작을 중심으로 하는 광질 변화에 따른 생리적 반응은 다양한 작물에서 활발히 연구되고 있다. 특히 새싹보리의 경우, 다양한 광 조건에서 일반 보리에 비해 건물중량이 크게 증가하고 단백질 및 항산화 물질 함량 또한 높은 수준으로 보고된 바 있다[20]. 보리와 같은 벼과에 속하는 곡물인 호라산 밀은 일반 밀에 비해 단백질 함량이 높고 영양이 우수하여, 호라산 밀삭 또한 생장과 함께 기능성 물질의 축적 가능성이 높을 것으로 추정된다. 그럼에도 불구하고, 자외선 A 및 원적색광과 같은 특정 파장의 광이 함께 조사되는 광 처리 하에서 호라산 밀삭의 발아와 생장 및 항산화 체계에 미치는 영향에 대해서는 아직 명확히 밝혀지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 자외선 A 및 원적색광을 포함한 복합광 처리가 호라산 밀삭의 형태학적 생장 특성과 항산화 활성에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

결과 및 고찰

발아율

호라산 밀의 발아율은 식물생장조절기에서 16시간이 경과한 후 백색광(WL: White light) 조건에서 가장 높았고, 복합광1(CL 1: Combined light 1)과 복합광2(CL 2: Combined light 2)는 각각 백색광 대비 약 61%와 49% 정도의 낮은 발아율을 보였다(Table 1). 이후 32시간 경과한 시점에서 백색광 처리군은 100%의 발아율에 도달한 반면, 복합광1과 복합광2 처리군은 상대적으

로 낮은 발아율을 보였다. 또한 복합광2 처리군의 경우, 48시간이 경과한 시점에도 완전한 발아율에 도달하지 않았으며, 100% 발아율에 도달하는데 걸린 시간은 백색광, 복합광1, 복합광2 순으로 짧았다. 이는 자외선과 원적색광을 포함한 복합광 처리로 인해 발아가 지연되었음을 시사한다. 또한, 자외선 A를 조사한 밀 종자의 발아율이 유의미하게 감소하였다는 기존 연구 결과와도 일치한다[21]. 또 다른 연구에 따르면 자외선 A 조사 시 세포분열속도가 저하되고 식물 호르몬 불균형 및 단백질 손상이 유도됨으로써 배아 생장이 억제된다고 알려져 있다[22]. 뿐만 아니라, 원적색광 조사 시 식물의 광수용체인 파이토크롬은 태양광의 적색 파장을 흡수하는 역할을 수행하는데, 이때 활성형인 Pfr에서 비활성형인 Pr로 역전환되며 발아가 억제된다고 보고된 바 있다[23]. 따라서, 동일 시점에서의 복합광 처리군이 백색광 대비 낮은 발아율을 보이는 것은 자외선 A 조사에 따른 스트레스가 원인일 것으로 추정할 수 있다.

Table. 1 Germination percentage of the Khorasan wheat under the different light conditions

	WL	CL 1	CL 2
16h	64.7±3.8	39.3±2.2	31.7±6.0
24h	82.3±2.4	70.0±3.1	61.3±7.5
32h	100.0	87.7±4.5	81.0±7.6
40h	100.0	100.0	89.7±5.7
48h	100.0	100.0	95.7±2.4

형태학적 지표

지상부 생장 특성을 대표하는 요소 중 하나인 초장은 지표면으로부터 수직방향의 식물 신장을 의미하며, 밀싹의 마디 길이와 가장 긴 잎의 길이를 합한 값으로 나타내었다. 분석 결과, 대조군에서 초장이 가장 크게 나타났으며, 복합광1 처리군보다 복합광2 처리군에서 유의하게 작은 값을 보여서 초장의 신장이 억제되는 경향을 확인할 수 있었다(Fig. 1A). 이는 두 복합광 조건에서 대조군과 비교하여 생장 속도가 둔화된 양상을 보였고, 광합성 유효광량의 차이에 따라 식물 생장 반응이 조절되었음을 시사한다. 특히, 복합광2 처리군에서 다소 작은 초장은 상대적으로 높은 PPFd에 따른 생장 억제 효과로 해석될 수 있다.

줄기 직경은 복합광 처리군이 백색광에 비해 전반적으로 굵게 나타났고, 11일차에 복합광1 처리군에서 복합광2보다 더 큰 증가율을 보였다(Fig. 1B). 이는 Li et al. [24]의 연구에서 원적색광을 처리한 밀 실험군이 백색광보다 더 굵은 줄기를 형성한 결과와 유사하며, 해당 변화가 식물이 원적색광 환경에서 광 스트레스를 완화하기 위한 형태학적 적응 기작임을 뒷받침하는 것으로 보인다. 뿐만 아니라, 자외선 처리 시 피질 미세소관의 배열이 무작위화 되어 셀룰로스 미세섬유의 배열에도 변화를 주며, 세포 확장 방향이 방사형 방향으로 바뀌어서 줄기 직경이 굵어진 것으로 보인다[25].

지하부 생장을 보여주는 뿌리 길이 또한 9일 이후 복합광 처리군에서 백색광보다 전반적으로 높은 값을 보였으며(Fig. 1C), 특히 복합광1 처리군에서 가장 활발한 뿌리 생장률을 보였다. 이는 해당 광 환경이 지하부 생장을 촉진하는 방향으로 작용했음을 의미하며, 높은 PPFd로 인해 발생된 광 스트레스 하에서 생장 균형을 유지하기 위한 적응 반응으로 생각된다. 이와 유사하게, 보리 유묘의 지상부에 자외선 조사 시 과산화효소 활성의 증가로 인해 세포벽이 경직되고, 결과적으로 뿌리 신장률이 감소하는 경향을 보고하였으며, 강한 자외선 조건 아래에서 뿌리 신장률이 매우 감소하여 일부 뿌리의 경우 성장이 완전히 정지되는 현상도 관찰되었다[25]. 반면, 본 실험에서는 복합광 처리가 지상부 생장을 억제하면서 동시에 상대적인 뿌리 생장을 촉진시킨 것으로 해석된다.

엽면적 및 생체중

호라산 밀은 식물체 중 잎이 차지하는 면적 비율이 높는데[26], 본 연구에서 엽면적은 7일차부터 복합광1 처리군에서 가장 높은 값을 보였다(Fig. 2A). 일반적으로 자외선의 조사는 세포 분열 및 세포 신장 속도를 감소시키고 잎 성장 기간을 단축시키며 세포의 신장률 또한 저하시켜 1차엽의 길이를 감소시킨다고 알려져 있다[27]. 하지만, 본 연구에서는 자외선 A와 원적색광을 약하게 조사한 복합광1 처리군에서 엽면적이 증가된 것으로 나타났으며, 이는 원적색광이 엽면적에 긍정적인 요소로 작용하였다

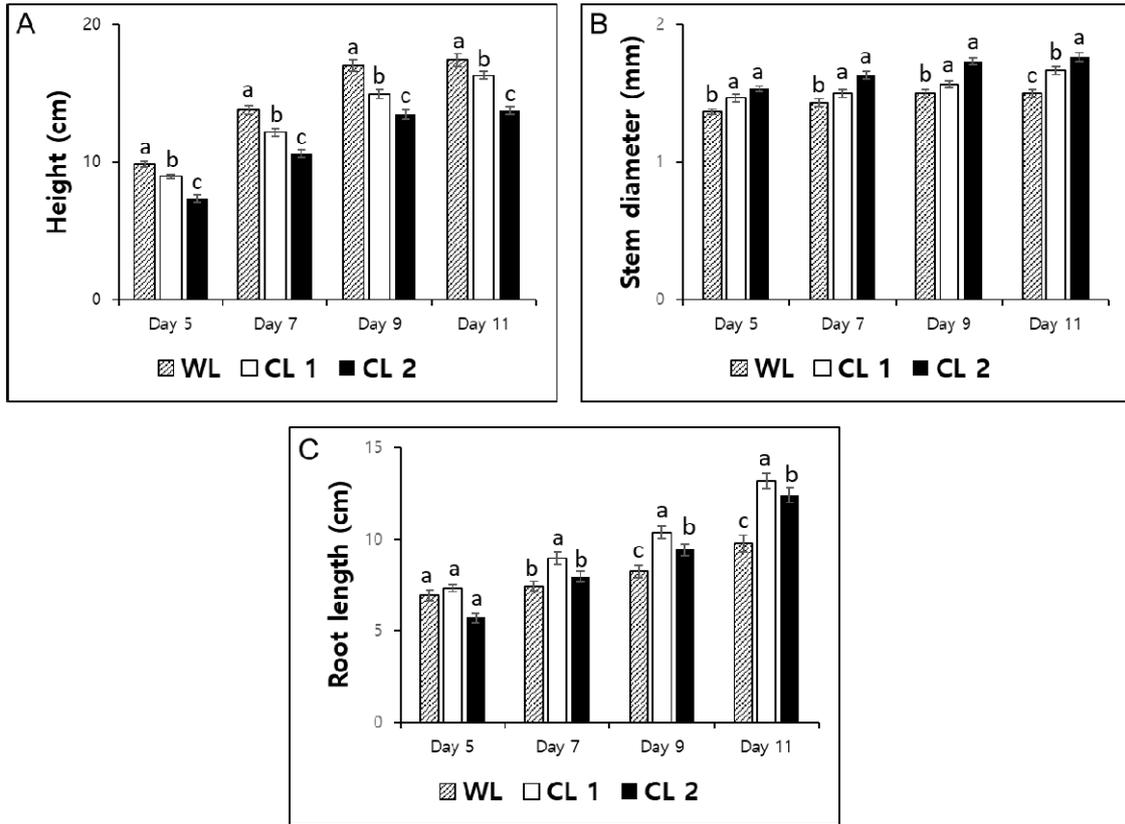


Fig. 1. Morphological parameters of Khorasan wheat sprouts grown under different light conditions: height (A), stem diameter (B), and root length (C).

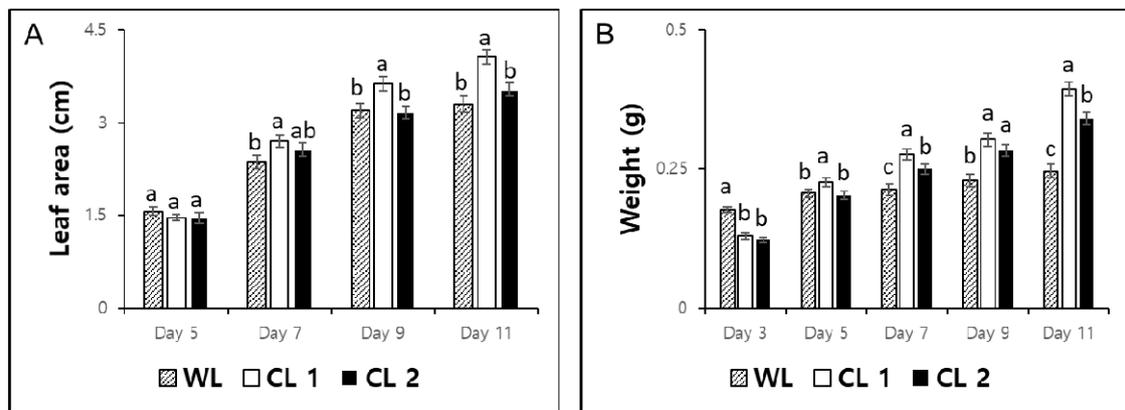


Fig. 2. Leaf area (A) and fresh weight (B) of Khorasan wheat sprouts during growth until Day 11.

는 연구 결과[14]와 유사하다.

생체중의 경우, 7일 이후 복합광 처리군에서 백색광 대비 높은 증가율을 보였으며, 11일차에서 복합광1 처리군에서 가장 높은 값을 나타내었다(Fig. 2B). 이는 보리의 경우 원적색광 비율이 높은 실험군의 생체중이 유의하게 증가한 연구[28]와 일치하는 반면, 흑색 밀을 대상으로 여러 종류의 광을 조사하였을 때 생체중이 감소하였다는 연구[21]와는 상이한 결과이다. 자외선 A를 조사한 밀 유묘의 생체중과 건물중 두 지표 모두 대조군에 비해 실험군이 높은 값을 보여준 연구[29]를 통해 본 연구의 복합광 처리가 식물의 성장 촉진에 긍정적인 영향을 준 것으로 보인다.

잎 건물중 무게와 함수율

잎의 건물중량은 실험 종료 시점인 11일차에 백색광 대비 복합광 처리군에서 증가한 것으로 나타났다(Fig. 3). 이는 복합광 처리로 인해 광 스트레스에 대한 적응 반응의 일환으로 잎 건물중량의 축적이 증가했음을 시사한다[15].

함수율의 경우, 백색광(86.7±2.5%), 복합광1(89.1±1.7%), 복합광2(86.1±2.8%) 처리군들 간의 유의미한 차이는 보이지 않았다. 따라서, 복합광 처리가 수분의 함량보다는 생체중의 축적에 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

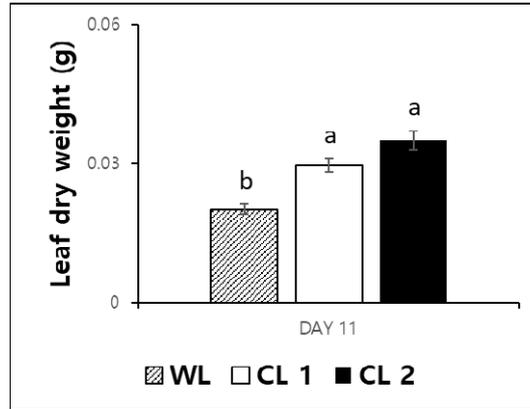


Fig. 3. Leaf dry weight of Khorasan wheat sprouts measured on Day 11.

총 폴리페놀 함량

폴리페놀은 식물이 광합성 후 생성하는 2차 대사산물의 일종으로, 생리활성을 지닌 주요 식물성화합물이다. 이러한 성분들은 작물에서 다양한 기능을 나타내고, 각 작물이 가진 영양적 측면의 효능을 정의하는 요소로 역할을 한다. 총 폴리페놀 함량의 분석 결과, 백색광 대비 복합광 처리군에서 낮은 함량을 나타냈으나, 통계적으로 유의미한 차이를 보이지는 않았다(Fig. 4). 9일, 11일 모두 유사한 경향을 나타냈으며, 이는 PPFD가 낮은 백색광과 높은 복합광 처리군 모두에서 정상적인 유기 산물의 축적이 가능했다는 것을 시사한다.

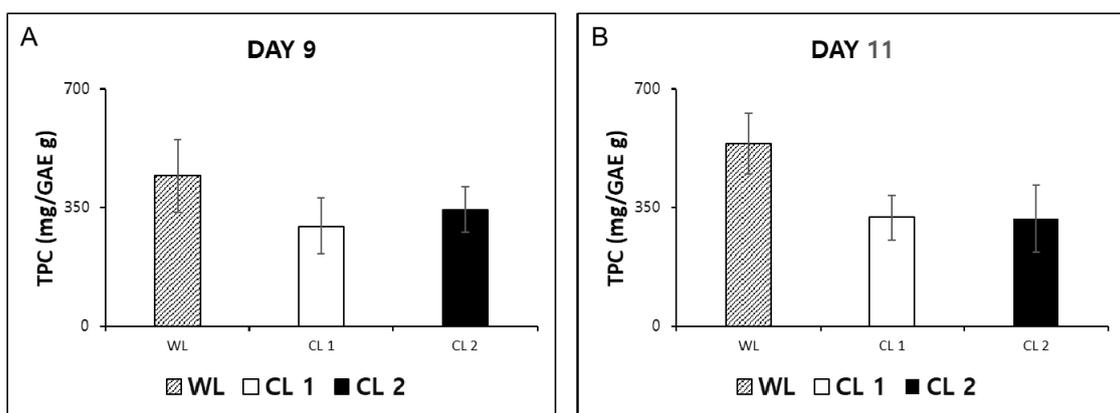


Fig. 4. Total polyphenol content (TPC) of Khorasan wheat sprouts on Day 9 (A) and Day 11 (B).

항산화 활성

호라스산 밀은 다양한 생리·기능성 성분이 주로 잎에 축적되는데[26], 이러한 성분의 축적은 환경 요인, 특히 광질의 변화와

밀접한 관련성이 있다[15]. 항산화 활성은 광 스트레스에 의한 반응의 일환으로, 항산화 활성 지표를 통해 광 조사에 따른 영향을 평가할 수 있다. Chen et al. [12]의 연구에서 일반 밀 종자에 자외선 B를 처리했을 때 항산화 효소 활성이 증가하는 경향을 보였다. 총 폴리페놀 함량과 광 처리에 따른 영향을 조사하기 위해 호라산 밀의 ABTS 라디칼 소거 활성을 조사하였다.

ABTS 분석 결과, 시료의 농도가 증가함에 따라 활성산소 라디칼 소거능이 향상되었고, 9일차와 11일차에서 항산화 활성이 유사한 경향을 보였다(Fig. 5). 시료 농도 2 mg/mL 이상의 조건에서는 대체로 백색광에서 복합광 처리군에 비해 항산화 활성이 유의하게 높게 나타났는데, 이는 백색광 처리군의 경우 복합광보다 더 많은 항산화 물질이 존재하여 라디칼을 보다 효과적으로 제거할 수 있었음을 의미한다. 실제로 백색광 처리군에서 총 폴리페놀 함량이 높다는 결과(Fig. 4)와도 잘 일치한다. 예외적으로 8 mg/mL 농도 조건에서 11일 경과 시점의 백색광과 복합광1 처리군 간 항산화 활성에서 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이러한 결과는 복합광2의 상대적으로 높은 PPFd로 인해 항산화 활성이 억제된 경향이 있는 것으로 보인다. 그러나 11일차의 복합광1 처리군이 9일차에 비해 항산화 활성이 유의하게 증가된 것은 특정 광 조건에 따른 초기의 항산화 반응 억제 시간이 경과함에 따라 적응되거나 극복되었을 가능성을 시사한다[30]. 따라서 광도가 높은 경우에는 항산화 기능이 일시적으로 저해될 수 있으며, 이는 식물체 내 항산화 관련 2차 대사산물의 생합성이 억제되는 광 스트레스 반응의 일환으로 해석될 수 있다[31,32].

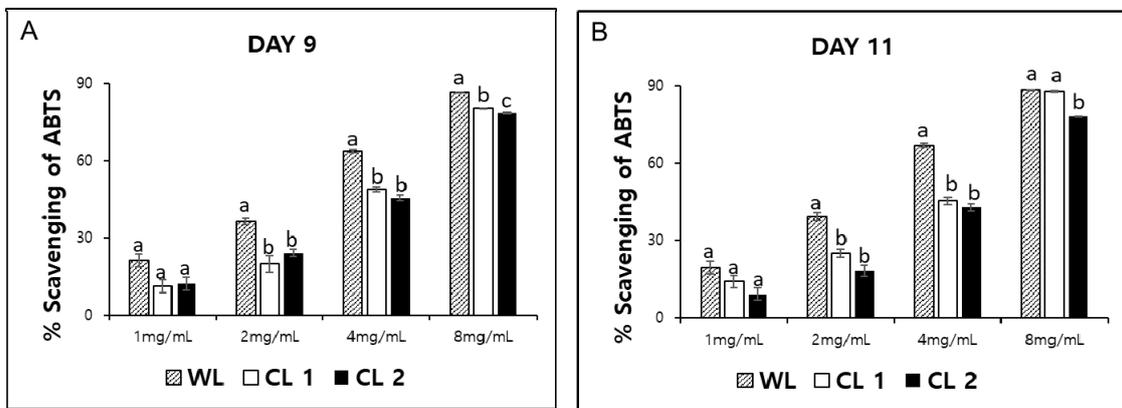


Fig. 5. ABTS radical scavenging activity of Khorasan wheat sprouts measured on Day 9 (A) and Day 11 (B) at different concentrations ranging from 1 to 8 mg/mL.

기존 연구에서 300~600 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광 조건에서 밀을 재배했을 때 지상부 건물중 축적이 증가했는데, 이는 식물이 광합성 효율을 높이기 위해 줄기 및 잎의 성장을 촉진하는 방향으로 반응했기 때문으로 해석된다[33]. 본 연구에서 복합광 처리군의 PPFd는 약 430~442 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 수준으로, 유사한 반응을 보인 것으로 추정된다. 그럼에도 불구하고, 항산화 활성의 경우 상대적으로 높은 PPFd 처리 하에서 더 낮은 경향을 보여, 광도와 조합된 스펙트럼 특성이 생체 내 유기물 축적에 일정 부분 영향을 미쳤음을 확인할 수 있었다. 이는 PPFd 조절뿐만 아니라 광질과의 상호작용이 호라산 밀의 생육에 일부 요인으로 작용한다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 기존의 밀 싹 또는 보리 싹을 대상으로 한 선행 연구에서 보고된 결과와 유사한 경향을 보이나, 종 간 반응 양상에는 차이가 있다는 사실을 시사한다[12].

본 연구는 다양한 광원으로 구성된 복합광 조사에 따른 호라산 밀 싹의 발아와 성장 및 생화학적 특성을 분석하였으나, 다음과 같은 보완 사항을 고려한 후속 연구가 필요하다. 첫째, 본 연구에 적용된 광 조건보다 다양한 광 조건을 적용하는 연구를 고려할 필요가 있다. 특히, 실험실 환경에서의 낮은 PPFd 값은 발아에 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있으나, 발아 후 호라산 밀 싹의 성장에는 충분하지 않은 것으로 보이므로, 발아 전과 후에 PPFd 값을 달리 적용하는 것을 고려할 수 있다. 또, 복합광의 경우, 건물중 축적이 증가하는 조건에서 실험을 수행하였으나, 호라산 밀 싹의 초장이 증가하면서 광원에 가까워져서 광 스트레스가 다소 발생한 것으로 보이므로, 실험의 광 조건 사이에 다양한 PPFd 값을 추가하는 것을 고려할 수 있다. 뿐만 아니라, 실험의 광 환경으로 인한 식물체 체온 상승 등의 부가적인 요인들과 복합광 구성의 다양화를 보다 체계적으로 고려한다면 좀 더 유익한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 둘째, 본 연구의 광조건 하에서 호라산 밀 종자는 24시간 이내에 50% 이상 발아하는

점을 고려하여 발아율 평가 시간 간격 및 전체 측정 시간을 조정하여 보다 정밀한 생리적 반응을 분석하는 것이 필요하다. 특히, 카메라와 사물인터넷 등을 활용하여 정해진 시간에 자동으로 영상을 촬영하고 인공지능 기술을 적용하여 영상을 분석함으로써 생장 정도를 나타내는 측정값을 도출하는 방법을 적용해 볼 수 있다. 셋째, 복합광 처리에 따른 호라산 밀의 형태학적 특성과 향산화 반응은 일부 유의미한 경향성을 보였으나, 그 기저에 작용하는 스트레스 반응에 대한 메커니즘은 명확히 규명되지 않았다. 따라서 다양한 스펙트럼 조합에 따른 생리·분자 수준의 스트레스 반응을 추가적으로 분석함으로써, 호라산 밀의 광 환경 적응성에 대한 보다 심층적인 이해가 가능할 것으로 기대된다.

본 연구에서는 주광색, 주백색, 적색, 자외선 A 및 원적색 LED로 구성된 패널을 이용하여 복합광의 조사에 따른 호라산 밀의 발아, 생장, 형태학적 특성, 향산화 활성 및 총 폴리페놀 함량에 미치는 영향을 종합적으로 평가하였다. 자외선 A와 원적색 광이 포함된 복합광 처리에 따라 줄기의 직경과 뿌리의 길이와 같은 형태학적 특성 및 생체중과 잎의 건물중량은 증진되는 경향을 보였으나, 초장과 엽면적은 백색광과 비교하여 유의한 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 또한, 총 폴리페놀 양이 감소하는 경향과 향산화 활성이 억제되는 양상을 통해서, 형태학적 특성의 변화와 향산화 활성이 서로 상반되는 경향을 확인할 수 있었다. 또한, 자외선 A와 원적색광의 수준이 다른 두 종류의 복합광에서 백색광과 비교하면 경향성은 비슷하게 나타나지만, 식물체의 반응 정도는 다소 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 연구 결과는 복합광 조합을 활용한 호라산 밀의 최적 생장을 위한 광 관리 전략을 위한 기초 자료로서 활용될 수 있으며, 특히 식물공장에서 생산하는 밀의 품질향상 및 향산화 활성 증진을 목표로 하는 식품 및 농업 분야에서 광 환경 구축에 기여할 수 있을 것이다.

재료 및 방법

실험 재료

실험에 사용된 호라산 밀은 캐나다에서 수입된 것으로, 온라인 상점을 통해 구입하여 -20°C 에서 보관하였다. 불순물 제거를 위해 호라산 밀을 100 mL의 75% 에탄올 수용액에 15분간 침지한 후 수돗물로 깨끗이 세척하였고[34], 상온의 암조건에서 6시간 정지한 뒤 동일한 방법으로 흐르는 수돗물에 여러 번 세척한 후 실험에 사용하였다.

실험 조건

세척된 호라산 밀 종자는 종이타월이 덮인 40×30 cm 크기의 플라스틱 망 구조의 재배용기에 겹치지 않게 배열하였고, 온·습도뿐만 아니라 빛과 물의 이용을 제어할 수 있도록 사용자 맞춤형으로 제작한 식물생장조절기(HK-GC460HLP, Hankuk S&I, Korea) 내에 해당 재배용기를 넣으면서 재배 시간의 측정을 시작하였다. 새싹의 발아와 생장에 필요한 물은 펌프(R-PK-BP01-400G, Aquatreat Solutions Limited, Kenya), 타이머(SJM-F16 3W, Seojun electric, Korea), 맞춤형제작한 관 및 노즐을 이용하여 재배용기 아래면에서 2시간마다 10분 동안 자동 분사되었다.

밀싹의 경우, $400 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 조건에서 성장과 기능성 강화에 적합하다는 연구[1]를 토대로, 주광색, 주백색, 적색, 자외선 A 및 원적색 LED로 구성된 두 종류의 패널(Quantum Board Plant Grow Lamp, Green Indoor Company, China)을 이용하여 광 조건을 결정하였다. 두 종류의 LED 패널에서 R:G:B 비율은 동일하게 5:5:2로 유지되었으나, 자외선 A와 원적색광 수준은 상이하게 구성되었다(이후 복합광1, 복합광2로 칭함). 밀의 초기생장에 적합한 $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 이하의 저광 조건[36]에 해당되는 실험실의 백색 LED(White LED, WL) 환경을 대조군으로 선정하였다[37,38](이후 백색광으로 칭함). 실험의 광 조건은 식물공장용 분광조도계(PG200N, Hi-Land Korea)를 이용하여 광합성 유효광량자속밀도(photosynthetic photon flux density, PPF)를 측정하였는데[35], 백색광에서 $7.4 \pm 2.0 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 복합광1에서 $429.7 \pm 23.4 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 복합광2에서 $441.6 \pm 46.5 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 이다. 자외선 A와 원적색광의 수준이 미미하였으나, 두 복합광에서 각각의 광 수준에 차이를 두어 그 영향을 비교하고자 하였다. 특히, 자외선 A에 따른 식물의 형태학적, 기능적 변화[39,40]를 확인하기 위해 두 복합광의 자외선 A 수준을 약 2:3으로 달리하였고, 식물의 광형태형성은 원적색광과 밀접한 관계가 있으므로[41] 두 복합광의 원적색광 수준을 약 3:4로 달리하여 밀의 발아 및 생장 특성을 분석하고자 하였다. 광주기는 타이머를 이용하여 주간 16시간, 야간 8시간으로 설정하였다. 광원과 재배용기 바닥면과의 거리는 약 50 cm로 고정하였으며, 식물생장조절기 내의 온도는 25°C , 상대습도는 약 60%를 유지하였다. 실험실 환경에서의 평균 온도는 $25 \sim 27^{\circ}\text{C}$, 상대습도는 45~50%로 유지되었다. 광 조건별 재배 실험은 총 3회 반복하였다.

발아율 및 생육 특성 측정

광 처리 조건에 따른 초기 생육 반응을 평가하기 위해 발아율 및 생육 특성을 측정하였다. 특히 발아율은 광 처리가 호라산 밀 종자의 생리적 활성 및 발아의 촉진에 미치는 영향을 확인하기 위한 지표로 사용되었다. 실험 시작 후 8시간 간격으로 발아한 종자의 수를 확인하고 뿌리가 2 mm 이상 자란 종자를 발아한 것으로 판단하였으며, 발아율은 발아한 종자의 수를 이용하여 Correia et al. [42]의 방법에 따라 아래의 식 (1)로 계산하였다.

$$\text{Germination percentage (\%)} = \left(\frac{\text{number of seeds germinated}}{\text{total number of seeds}} \right) \times 100 \quad (1)$$

호라산 밀씨의 형태학적인 생육 지표 측정을 위해 각 광조건에서 무작위로 50개를 선정한 후, 버니어캘리퍼(CD-P15S, Mitutoyo, Tokyo, Japan)를 이용하여 실험시작 후 5, 7, 9, 11일이 경과한 지점에서 초장, 뿌리 길이, 줄기 직경을 측정하였다. 엽면적은 계수법을 활용하여 아래의 식 (2)로 계산하였다[43].

$$\text{Leaf area (cm}^2\text{)} = \text{length} \times \text{width} \times 0.75 \quad (2)$$

식물체의 생체중은 전자저울을 이용하여 측정하였고, 건물중과 함수율은 함수를 측정기(Infrared Moisture Determination Balance FD-720, Sagix Solutions, Bangalore, India)를 이용하여 샘플을 105°C에서 건조시키면서 무게의 변화가 없을 때의 값을 토대로 측정하였다.

총 폴리페놀 함량 및 항산화 활성 분석

시료 전처리 및 추출

호라산 밀의 기능성 성분의 변화를 평가하기 위해서 총 폴리페놀 함량을 측정하고 3-에틸벤조티아졸린-6-술폰산(ABTS) 소거 활성을 통해 항산화 활성을 측정하였다. 총 폴리페놀 함량은 광 처리에 따라 축적되는 기능성 성분의 함량을 평가하기 위한 지표로 사용되었다. 9일 또는 11일간 재배한 호라산 밀은 수확 후 -80°C 초저온냉동고에 24시간 이상 저장한 후, 동결건조기(Bondiro, Ilshinbio, Korea)로 96시간 건조하였고, 믹서기로 분쇄한 분말 형태로 -80°C에 보관하였다.

분말 시료의 추출을 위해서 Rodriguez-Bernaldo de Quiros et al. [44]의 방법을 일부 변형한 방법을 이용하였다. 간단히 요약하면, 한 번에 시료 0.3 g을 70% 에탄올 용매 100 mL와 혼합하고, 실온에서 24시간 동안 방치하여 상층액만 분리하였다. 이러한 과정을 통하여 시료별로 총 300 mL의 추출액을 확보하였다. 확보된 추출액은 초음파추출기(Ultrasonic Cleaner UCP-10, JEIO TECH, Korea)를 사용하여 31°C에서 5분간 초음파 모드로 추출한 후 7 mL씩 분취하였고, 이를 원심농축기(EYELA Centrifugal Concentrator CVE-3110, Sunil EYELA Co. Ltd., Korea)로 28°C에서 7시간 동안 농축한 후 실험에 사용하였다.

총 폴리페놀 함량 분석

농축한 시료에 대한 총 폴리페놀 함량은 Folin-Ciocalteu's phenol 시약을 이용한 발색법을 변형하여 측정하였다[45]. 시료용액 0.1 mL에 증류수 0.75 mL와 Folin-Ciocalteu 시약 0.05 mL, 35% 탄산나트륨(Na_2CO_3) 0.1 mL를 혼합한 후 20분간 암실에서 반응시킨 후 760 nm에서 흡광도를 측정하였다. 아래의 식(3)을 이용하여 갈산 환산농도(x)에 추출한 용액의 부피(V)를 곱한 값을 시료의 무게(m)로 나누어서 계산하였다.

$$\text{Total polyphenol content (mg GAE/g)} = \left(\frac{x \times V}{m \times 1000} \right) \times 100 \quad (3)$$

ABTS 라디칼 소거능 측정

항산화 활성을 확인하기 위해서 농축한 시료를 이용하여 기존에 보고된 방법에 따라 7 mM ABTS 용액과 140 mM 과황산칼슘($K_2S_2O_8$)을 사용하여 ABTS 라디칼 소거능을 측정하였다[46]. 간단히 요약하면, 5 mL의 7 mM ABTS 용액에 140 mM 과황산칼슘 88 μ L를 혼합한 후, 실온 조건의 암실에서 12~16시간 동안 반응시켜 ABTS 양이온을 생성시켰다. 이 용액의 흡광도를 743 nm에서 측정하여 0.7 ± 0.002 가 되도록 조절한 후 ABTS 작업용 액으로 사용하였다. 시료 50 μ L와 ABTS 작업용액 1 mL를 혼합한 후 교반기를 이용하여 2분 30초간 반응시킨 뒤 734nm에서 흡광도를 측정하였고, 식 (4)를 이용하여 라디칼 소거능을 계산하였다.

$$\text{Radical scavenging activity (\%)} = \left(1 - \frac{\text{sample OD}}{\text{control OD}}\right) \times 100 \quad (4)$$

여기서 OD는 흡광도(optical density)를 의미한다. 각 시료는 조건별로 1, 2, 4, 8 mg/mL의 농도로 분석을 수행하였으며, 라디칼 소거능은 시료의 첨가 전후 차이를 백분율로 나타내었다.

통계해석

실험은 무작위 배치로 3회 반복하여 수행하였으며, 각 결과는 평균 \pm 표준오차(mean \pm SEM)로 나타내었다. 광 처리군들 간의 차이는 일원분산분석(one-way ANOVA)과 Tukey의 HSD 다중비교검정(Tukey's Honestly Significant Difference test)을 통한 사후 검정 방법으로 Prism 10 (GraphPad Software, San Diego, CA, USA)을 이용하여 확인하였다. 통계적 유의수준은 $p \leq 0.05$ 로 설정하였다.

Data Availability: All data are available in the main text or in the Supplementary Information.

Author Contributions: J.K. conceptualized and supervised the study and acquired funding. J.K. and D.H. conceived and designed the experiments. R.K, J.P, S.B., S.L. and S.Y. collected the data and performed the analysis. R.K, J.P, S.B. and S.L. wrote the original manuscript. J.K, J.P., S.B. and D.H. revised the manuscript. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This work was supported by the Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation (IITP)-Innovative Human Resource Development for Local Intellectualization program grant funded by the Korea government (MSIT) (IITP-2025-RS-2020-II201489).

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.30>

Correspondence and requests for materials should be addressed to Jungsil Kim.

Peer review information Korean Journal of Environmental Agriculture thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Reprints and permissions information is available at <http://www.korseaj.org>

References

1. Kim YJ, Shin YM, Lee H, Moon SY, Kim TJ, Park SU, Seo WD, Kim JK (2025) Comparative analysis of primary and secondary metabolites in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) cultivated under varying photosynthetic photon flux densities and growth periods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, <https://doi.org/10.1002/jsfa.14432>.
2. Shlisky J, Bloom DE, Beaudreault AR, Tucker KL, Keller HH, Freund-Levi Y, Fielding RA, Cheng FW, Jensen GL, et al. (2017) Nutritional considerations for healthy aging and reduction in age-related chronic disease. *Advances in Nutrition*, 8(1), 17-26. <https://doi.org/10.3945/an.116.013474>.
3. Jędrusek-Golińska A, Górecka D, Buchowski M, Wieczorowska-Tobis K, Gramza-Michałowska A, Szymandera-Buszk K (2020) Recent progress in the use of functional foods for older adults: A narrative review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(2), 835-856. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12530>.
4. Mittal RK, Mishra R, Sharma V, Purohit P (2024) Bioactive exploration in functional foods: Unlocking nature's treasures. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 25(11), 1419-1435. <https://doi.org/10.2174/0113892010282580231120041659>.
5. Ye EQ, Chacko SA, Chou EL, Kugizaki M, Liu S (2012) Greater whole-grain intake is associated with lower risk of type 2 diabetes, cardiovascular disease, and weight gain. *The Journal of Nutrition*, 142(7), 1304-1313. <https://doi.org/10.3945/jn.113.179473>.
6. Saleem A, Akhtar MF, Sharif A, Akhtar B, Siddique R, Ashraf GM, Alghamdi BS, Alharthy SA (2022) Anticancer, cardio-protective and anti-inflammatory potential of natural-sources-derived phenolic acids. *Molecules*, 27(21), 7286. <https://doi.org/10.3390/molecules27217286>.
7. Mattila P, Pihlava J-m, Hellström J (2005) Contents of phenolic acids, alkyl- and alkenylresorcinols, and avenanthramides in commercial grain products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(21), 8290-8295. <https://doi.org/10.1021/jf051437z>.
8. Spisni E, Valerii MC, De Fazio L, Rotondo E, Di Natale M, Giovanardi E, Posabella G, Bregola V, Stenico V, et al. (2020) A Khorasan wheat-based diet improves systemic inflammatory profile in semi-professional basketball players: a randomized crossover pilot study. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(11), 4101-4107. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9947>.
9. Trozzi C, Raffaelli F, Vignini A, Nanetti L, Gesuita R, Mazzanti L (2019) Evaluation of antioxidative and diabetes-preventive properties of an ancient grain, KAMUT® khorasan wheat, in healthy volunteers. *European Journal of Nutrition*, 58, 151-161. <https://doi.org/10.1007/s00394-017-1579-8>.
10. Correa MdSS, Saavedra MeRR, Parra EAE, Ontiveros EN, Flores JdCB, Montiel JGO, Contreras JEC, Urrutia EL, Acevedo JGÁ, et al. (2023) Ultraviolet radiation and its effects on plants. Abiotic stress in plants-adaptations to climate change. <https://doi.org/10.5772/intechopen.109474>
11. Dadashi-Silab S, Doran S, Yagci Y (2016) Photoinduced electron transfer reactions for macromolecular syntheses. *Chemical Reviews*, 116(17), 10212-10275. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00586>.
12. Chen Z, Ma Y, Weng Y, Yang R, Gu Z, Wang P (2019) Effects of UV-B radiation on phenolic accumulation, antioxidant activity and physiological changes in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Food Bioscience*, 30, 100409. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2019.04.010>.
13. Wang F, Yan J, Ahammed GJ, Wang X, Bu X, Xiang H, Li Y, Lu J, Liu Y, et al. (2020) PGR5/PGRL1 and NDH mediate far-red light-induced photoprotection in response to chilling stress in tomato. *Frontiers in Plant Science*, 11, 669. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00669>.
14. Legendre R, van Iersel MW (2021) Supplemental far-red light stimulates lettuce growth: Disentangling morphological and physiological effects. *Plants*, 10(1), 166. <https://doi.org/10.3390/plants10010166>.
15. Li J, Guo X, Zhang S, Zhang Y, Chen L, Zheng W, Xue X (2022) Effects of light quality on growth, nutritional characteristics, and antioxidant properties of winter wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.). *Frontiers in Plant Science*, 13, 978468. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.978468>.
16. Kasajima S-y, Inoue N, Mahmud R, Fujita K, Kato M (2007) Effect of light quality on developmental rate of wheat under continuous light at a constant temperature. *Plant Production Science*, 10(3), 286-291. <https://doi.org/10.1626/pps.10.286>.
17. Klem K, Gargallo-Garriga A, Rattanapichai W, Oravec M, Holub P, Veselá B, Sardans J, Peñuelas J, Urban O (2019) Distinct morphological, physiological, and biochemical responses to light quality in barley leaves and roots. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1026. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01026>.
18. He R, Li Y, Ou S, Gao M, Zhang Y, Song S, Liu H (2021) Regulation of growth and main health-promoting compounds of Chinese kale baby-leaf by UV-A and FR light. *Frontiers in Plant Science*, 12, 799376. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.799376>.
19. Zhang Y, Li Z, Zhang N, Chai X (2024) The effects of FR and UVA irradiation timing on multi-omics of purple lettuce in plant factories. *Agriculture*, 14(11), 2019. <https://doi.org/10.3390/agriculture14112019>.
20. Oh G, La I-J, Lee D-S, Chae J-W, Im J-H, Park SW, Fu X, Lim J-S, Kim M-H, et al. (2025) Assessment of bioactive compounds and antioxidant activity of barley sprouts. *Separations*, 12(3), 68. <https://doi.org/10.3390/separations12030068>.
21. Lan H, Wang C, Yang Z, Zhu J, Fang W, Yin Y (2024) The impact of lighting treatments on the biosynthesis of phenolic acids in black wheat seedlings. *Foods*, 13(16), 2499. <https://doi.org/10.3390/foods13162499>.

22. Begum H, Hamayun M, Shad N, Khan W, Ahmad J, Khan M, Jones D, Ali K (2021) Effects of UV radiation on germination, growth, chlorophyll content, and fresh and dry weights of *Brassica rapa* L. and *Eruca sativa* L.. Sarhad Journal of Agriculture, 37(3), 1016-1024. <https://doi.org/10.17582/journal.sja/2021/37.3.1016.1024>.
23. Wei Y, Wang S, Yu D (2023) The role of light quality in regulating early seedling development. Plants, 12(14), 2746. <https://doi.org/10.3390/plants12142746>.
24. Li C, Luo Y, Jin M, Sun S, Wang Z, Li Y (2021) Response of lignin metabolism to light quality in wheat population. Frontiers in Plant Science, 12, 729647. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.729647>.
25. Ktitorova I, Skobeleva O, Kanash E, Bilova T, Sharova E (2006) Causes of root growth retardation induced by ultraviolet-B irradiation of shoots in barley seedlings. Russian Journal of Plant Physiology, 53, 85-95. <https://doi.org/10.1134/S1021443706010110>.
26. Lee H, Yang JY, Ra JE, Ahn H-J, Lee MJ, Kim HY, Song S-Y, Kim DH, Lee JH, et al. (2023) Elucidation of phenolic metabolites in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) by NMR and HPLC-Q-Orbitrap-MS/MS: Changes in isolated phenolics and antioxidant effects through diverse growth times. Food Chemistry: X, 17, 100557. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100557>.
27. Hopkins L, Bond M, Tobin AK (2002) Ultraviolet-B radiation reduces the rates of cell division and elongation in the primary leaf of wheat (*Triticum aestivum* L. cv Maris Huntsman). Plant, Cell & Environment, 25(5), 617-624. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00834.x>.
28. Doroszewski A, Doroszewska T, Podleśna A (2020) Far red and red as factors forming physiological processes in spring barley under controlled conditions. Agronomy, 10(12), 2007. <https://doi.org/10.3390/agronomy10122007>.
29. Yang S-H, Wang L-J, Li S-H, Duan W, Loescher W, Liang Z-C (2007) The effects of UV-B radiation on photosynthesis in relation to Photosystem II photochemistry, thermal dissipation and antioxidant defenses in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings at different growth temperatures. Functional Plant Biology, 34(10), 907-917. <https://doi.org/10.1071/FP07083>.
30. Park YR, Kwon S-J, Kim JH, Duan S, Eom SH (2024) Light-induced antioxidant phenolic changes among the sprouts of lentil cultivar. Antioxidants, 13(4), 399. <https://doi.org/10.3390/antiox13040399>.
31. Ghasemzadeh A, Jaafar HZ, Rahmat A, Wahab PEM, Halim MRA (2010) Effect of different light intensities on total phenolics and flavonoids synthesis and anti-oxidant activities in young ginger varieties (*Zingiber officinale* Roscoe). International Journal of Molecular Sciences, 11(10), 3885-3897. <https://doi.org/10.3390/ijms11103885>.
32. Zhang Q, Su L-J, Chen J-W, Zeng X-Q, Sun B-Y, Peng C-L (2012) The antioxidative role of anthocyanins in Arabidopsis under high-irradiance. Biologia Plantarum, 56(1), 97-104. <https://doi.org/10.1007/s10535-012-0022-5>.
33. Dong C, Fu Y, Liu G, Liu H (2014) Low light intensity effects on the growth, photosynthetic characteristics, antioxidant capacity, yield and quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) at different growth stages in BLSS. Advances in Space Research, 53(11), 1557-1566. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.02.004>.
34. Chen Y, Li T, Yang Q, Zhang Y, Zou J, Bian Z, Wen X (2019) UVA radiation is beneficial for yield and quality of indoor cultivated lettuce. Frontiers in Plant Science, 10, 1563. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01563>.
35. He J, Qin L, Liu Y, Choong TW (2015) Photosynthetic capacities and productivity of indoor hydroponically grown *Brassica alboglabra* Bailey under different light sources. American Journal of Plant Sciences, 6(4), 554-563. <http://doi.org/10.4236/ajps.2015.64060>.
36. Han T, Astafurova T, Turanov S, Burenina A, Butenkova A, Surnina E, Valiev D (2020) Photomorphogenesis of wheat sprouts with LED irradiation of different intensities. Lighting Research & Technology, 52(5), 583-594. <https://doi.org/10.1177/14771477153519894716>.
37. Momin A, Khatoon A, Khan W, Konuşkan D, Aslam M, Jamil M, Rehman S, Baber A, Kaplan A, et al. (2024) Effect of light emitting diodes (LEDs) on growth, mineral composition, and nutritional value of wheat & lentil sprouts. Phytion, 93(6), 1117. <https://doi.org/10.32604/phytion.2024.048994>.
38. Vitale E, Velikova V, Tsonev T, Costanzo G, Paradiso R, Arena C (2022) Manipulation of light quality is an effective tool to regulate photosynthetic capacity and fruit antioxidant properties of *Solanum lycopersicum* L. cv. 'Microtom' in a controlled environment. PeerJ, 10, e13677. <http://doi.org/10.7717/peerj.13677>.
39. Kang S, Kim JE, Zhen S, Kim J (2022) Mild-intensity UV-A radiation applied over a long duration can improve the growth and phenolic contents of sweet basil. Frontiers in Plant Science, 13, 858433. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.858433>.
40. Che G, Chen M, Li X, Xiao J, Liu L, Guo L (2024) Effect of UV-A irradiation on bioactive compounds accumulation and hypoglycemia-related enzymes activities of broccoli and radish sprouts. Plants, 13(3), 450. <https://doi.org/10.3390/plants13030450>.
41. Ugarte CC, Trupkin SA, Ghiglione H, Slafer G, Casal JJ (2010) Low red/far-red ratios delay spike and stem growth in wheat. Journal of Experimental Botany, 61(11), 3151-3162. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq140>.
42. Correia C, Areal E, Torres-Pereira M, Torres-Pereira J (1999) Intraspecific variation in sensitivity to ultraviolet-B radiation in maize grown under field conditions: II. Physiological and biochemical aspects. Field Crops Research, 62(2-3), 97-105. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00164-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00164-6).
43. Chanda S, Singh Y (2002) Estimation of leaf area in wheat using linear measurements. Plant Breeding and Seed Science, 46(2), 75-79. <http://ojs.ihar.edu.pl/index.php/pbss/article/view/778>.
44. Rodriguez-Bernaldo de Quiros A, Paseiro-Cerrato R, Pastorelli S, Koivikko R, Simoneau C, Paseiro-Losada P (2009) Migration of photo-

- initiators by gas phase into dry foods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(21), 10211-10215. <https://doi.org/10.1021/jf9026603>.
45. Pérez M, Dominguez-López I, Lamuela-Raventós RM (2023) The chemistry behind the folin–ciocalteu method for the estimation of (poly) phenol content in food: Total phenolic intake in a mediterranean dietary pattern. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(46), 17543-17553. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04022>.
46. Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice-Evans C (1999) Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9-10), 1231-1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3).