

화재 안전을 위한 왕겨 기반 다기능 샌드위치 패널 적용 방안

장승현*, 최제호**, 김승한***, 조윤찬*, 진주완*

*건양대학교 재난안전소방학과, **건양대학교 스마트농산업학과, ***건양대학교 방재보안학과
e-mail:21683026@konyang.ac.kr

Application Plan of Rice Husk-Based Multifunctional Sandwich Panels for Fire Safety

Seung-Hyeon Jang*, Je-Ho Choi**, SeungHan Kim***, Yun-Chan Jo*,
Juan Jin*

*Dept. of Disaster Safety & Fire Fighting, **Dept. of Smart Agricultural Technology and
Innovation, ***Dept. of Disaster Prevention and Security, Konyang University

요약

최근 건축 분야에서는 안전 관련 법규가 강화됨에 따라 유기 단열재 기반 샌드위치 패널의 화재 취약성 극복과 단열성능 확보가 부상하고 있다. 이에 본 연구는 0.048 W/m·K의 낮은 열전도율을 지닌 왕겨와 내화성 및 조습성이 뛰어난 탄화 왕겨를 결합한 왕겨 기반 다기능 샌드위치 패널을 제안하였다. 본 설계는 양 외곽층에 고밀도 압축 왕겨 보드를 배치하여 고효율 단열막과 구조적 강성을 형성하고, 중심 코어에 탄화 왕겨 보드를 두어 방화대를 구축하는 3중 복합 구조이다. 기초 소재 실험 결과 압축 왕겨 보드는 기존 MDF 대비 약 2배 이상의 압축 강도를 확보하였으며, 10분간의 직접 화염 노출 시험에서도 연소 전이가 발생하지 않아 다기능 패널로서의 가능성을 확인하였다. 향후 상용화를 위해서는 KS F ISO 13784-1 규격의 실물모형 시험 검증과 이질 소재 간 계면 부착 강도 확인이 요구되며, 나아가 대량생산을 위한 공정 표준화 및 경제성 분석이 병행되어야 할 것이다.

1. 서론

샌드위치 패널은 건축물 내·외벽 및 지붕에 쓰이며 양면 도장 강판 사이에 단열 심재를 배치한 복합 자재로서 건설 현장의 인력난 해소와 건식 공법 적용에 따른 시공의 편의성을 바탕으로 그 사용량이 지속적으로 증가해 왔다[1]. 그러나 이 샌드위치 패널의 화재 취약성이 주목받고 있는데, 최근 발생한 대전 안전공업 화재 참사(2026.03)는 14명의 사망자와 60명의 부상자를 발생시켰으며, 이는 기존 건축 자재의 한계를 드러낸 사례이다. 당시 사고 공장은 난연 2급 성능을 갖춘 샌드위치 패널로 마감되어 있었음에도, 불길이 삽시간에 건물 전체로 번지며 샌드위치 패널에서 동반된 유독가스가 피해 확대 요인 중 하나로 지목되었다[2].

이에 따라, 기존 단열재의 단점을 극복하기 위한 대안으로 왕겨의 특성에 주목하였다. 왕겨는 약 20%의 실리카(SiO_2) 성분을 가지고 있어 미생물 분해가 어렵고 소각 시 다량의 회분이 발생하여 폐기 처리에 어려움이 있다는 특징이 있다[3]. 또한 0.048 W/m·K의 낮은 열전도율을 가지고 있어 보온 소재로 우수하며 다공성 구조로 인해 단열에 유리하다[4].

본 연구에서 왕겨의 특성을 이용하여 기존 단열재의 결함을 해결할 수 있는 왕겨 기반 다기능 샌드위치 패널을 제안하고자 한다.

2. 현황 및 기존 단열재의 한계 분석

2.1 건축용 샌드위치 패널의 현황 분석

샌드위치 패널은 건축물 내·외벽 및 지붕에 쓰이며 양면 도장 강판 사이에 단열 심재를 배치한 복합 자재로서 건설 현장의 인력난 해소와 건식 공법 적용에 따른 시공의 편의성을 바탕으로 그 사용량이 지속적으로 증가해 왔다. 그러나 반복되는 대형 화재 사고로 인해 화재 안전 관련 법규가 강화되면서 기존 발포 폴리스티렌(EPS) 중심의 시장 구조는 암면이나 유리솜과 같은 불연 성능을 갖춘 무기질 단열재로 재편되고 있다[5].

2.2 기존 단열재의 한계 분석

기존 샌드위치 패널에 주로 사용되는 발포 폴리스티렌 및 폴리우레탄(PUR) 등 유기 단열재는 화재에 취약하여 연소 확산이 빠르며 연소 시 다량의 유해 가스를 발생시킨다는 한계가 존재한다. 유기 단열재의 화재 위험성 평가 실험 결과에 따르면 표 1과 같이 유기 단열재 심재 중 하나인 폴리이소시아누레이트(PIR)의 연소 시 일산화탄소(CO) 방출량은 22,640ppm으로 측정되었으며 이는 일반적인 발포 폴리스티렌의 방출량인 6,532ppm 대비 약 3.4배 높은 수치로 확인되었다[6].

[표 1] 연소 시 유해가스 방출량

단열재	CO(ppm)	CO2(ppm)	CO 배율
EPS	6532	3540	1.00
PIR	22640	551	3.47
SPU	18470	92	2.83
PF	3592	408	0.55

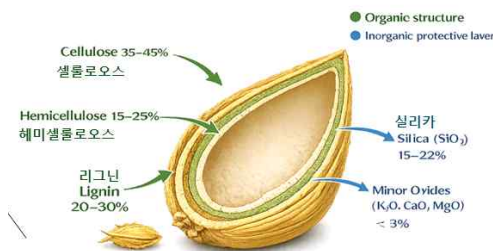
또한 난연 성능을 개선하기 위해 제작된 일부 유기 단열재 샌드위치 패널의 경우에도 실물모형 시험(KS F ISO 13784-1) 결과 화염 확산 제어 성능이 떨어지거나 개정된 성능 기준을 확보하지 못하는 사례가 보고되고 있으며, 이와 더불어 샌드위치 패널은 양면 강판 구조의 특성상 화재 발생 시 소화수가 내부 심재에 침투하기 어려워 초기 진압을 방해하며 심재 내 미세 공극에 포함된 산소로 인해 외부 공기 유입 없이도 연소가 지속되는 물리적 결합을 보유하고 있다[7]. 무기질 단열재의 경우 화재 안전성은 상대적으로 높으나 수분에 노출될 경우 단열성능이 급격히 저하되는 취약성을 지니며 특히 글라스울 등은 습기 흡수 시 자체의 처짐이나 뭉침 현상이 발생하는 등 물리적 노후화가 진행되어 장기적인 단열성능을 유지하는 데 한계가 있다[8].

이에 따라 기존 단열재는 화재 안전성을 충족하지 못하고 있으며 이러한 한계를 극복하기 위해서는 소재 자체의 특성에서부터 근본적인 대안을 찾아야 한다.

3. 왕겨 기반 소재의 물질적 특성

3.1 왕겨의 화학적 조성 및 물성

농업 부산물인 왕겨는 쌀의 외피로 주로 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌 등의 유기물과 실리카(SiO₂)를 주성분으로 하는 무기물이 결합한 복합적인 구조를 띠고 있다. 전체 중량의 약 60~70%가 셀룰로오스계 성분으로 구성되어 있고, 무기물인 실리카는 약 15~22% 함유되어 있으며, 구체적인 화학적 조성은 그림 1과 같다.



[그림 1] 왕겨 성분 구성

왕겨의 주요 성분 중 하나인 셀룰로오스는 형태를 유지하는 골격 역할을 하며 연소 시 실리카 구조와 상호작용하여 급격한 연소 확산을 억제하는 데 기여한다. 실리카는 리그닌과 함께 무기

질 보호층을 형성하여 수분 및 미생물의 침투를 억제할 뿐만 아니라, 화재 시 열전달을 효과적으로 차단하고 견고한 탄화층을 유지하는 방화벽 역할을 수행한다[9]. 또한 왕겨는 0.048 W/m·K의 단열성능을 가지는데 이는 자체적으로도 충분한 단열 효과가 있음을 입증한다.

3.2 기존 사례 동향

현재 왕겨를 활용한 건축용 패널 기술은 지속적으로 연구되어 왔으나, 제조 공정 및 소재적 한계로 인해 상용화에 어려움을 겪고 있다. 표 2는 기존 왕겨 보드 및 패널 기술의 동향과 본 연구에서 제안하는 제조 기술의 차별성을 비교한 것이다.

[표 2] 국내·외 왕겨 기반 패널 기술

구분	기존 기술	한계 및 문제점	연구 기술 차별성
기술 개요	고온압착 및 수지기반 왕겨보드 기술 (KR 10-2024-0096073)	고온 공정 필요 → 제조 에너지 증가 및 생산 비용 상승	상온 압축 기반 왕겨 구조 패널 제조 기술
소재 구성	수지·발수제 혼합 왕겨단열 패널 (KR 10-2019-0068700)	합성수지 의존도 높음 → 친환경성 저하 및 재활용 어려움	친환경 바인더를 활용한 결합 기술
성형 방식	왕겨 파쇄·혼합 방식 경량 패널 (EP 0729814B1)	구조 강도 및 장기 내구성 데이터 부족	통왕겨·분쇄왕겨·탄화왕겨 적용 가능 압축 성형
제품 형태	규격·형상이 고정된 판재 중심 (JPS5852489B2)	특정 건축 용도 중심 → 활용 범위 제한	두께·규격·표면 구조 설계 가능

기존의 왕겨 패널과 왕겨보드 제조 기술은 주로 고온 분쇄 압착 방식과 합성수지 기반의 결합제를 사용해 왔다. 그러나 이러한 방식은 제조 과정에서 막대한 에너지를 소모하여 생산 단가를 상승시킬 뿐만 아니라, 화학적 합성수지에 대한 높은 의존도로 인해 왕겨 본연의 친환경성을 훼손하고 폐기 시 재활용을 어렵게 만드는 치명적인 단점이 있다. 또한, 단순히 왕겨를 파쇄하여 혼합하는 방식은 건축 자재로서 필수적인 구조적 강도와 장기 내구성을 보장하기 어려웠으며, 생산되는 규격과 형상이 고정된 판재로 한정되어 실제 샌드위치 패널과 같은 다양한 두께의 심재로 활용하는 데 한계가 있었다. 특히 탄화 왕겨의 경우 내부에 미세 공기층을 보존하고 있어 약 0.048 W/m·K 내외의 열전도율을 보유한다. 또 주변 습도가 높을 때 수분을 흡수하고 건조할 때 배출하는 탁월한 조습성을 지니고 있다[11]. 그러나 이를 샌드위치 패널의 심재로 활용하기 위해 기존처럼 탄화 왕겨를 분말 형태로 분쇄하여 보드로 제작할 경우, 고유의 다공성 구조가 파괴되어 열전도율이 떨어지는 문제가 발생한다[12].

따라서 미가공 탄화 왕겨의 훌륭한 단열성능을 잃지 않으면서도 건축 자재로서의 구조적 강도를 확보하기 위해서는, 입자 간의 간격과 다공성 구조를 유지한 채 보드로 성형하는 압축 기술이 요구된다.

3.3 왕겨 기반 패널의 성능 실험 및 분석

본 연구에서 제안하는 왕겨 기반 다기능 샌드위치 패널 제작에 앞서 왕겨 보드의 실제 성능을 검증하기 위해 기계적 강도 및 내화성능 시험을 실시하였다.

왕겨 패널의 구조적 강도를 측정할 결과 그림 2와 같이 기존 건축용 판재로 널리 사용되는 중밀도 섬유판(MDF) 대비 약 2배 이상의 압축 및 구조 강도를 확보하는 것을 확인하였다.



[그림 2] 강도 실험 왕겨 보드(좌), MDF(우)

또 화재 안전성을 평가하기 위해 10분간의 직접 화염 노출 시험을 실시하였다. 그림 3과 같이 시험 결과 패널 표면의 일부 탄화 현상은 발생하였으나 화염이 내부로 확산되거나 인접 부위로 연소가 전이되는 현상은 발견되지 않았다. 이는 왕겨 고유의 실리카 성분이 연소 시 보호층을 형성하여 화염의 침투를 억제했기 때문으로 분석되며, 기존 유기 단열재와 차별화되는 우수한 난연 특성을 확인하였다.



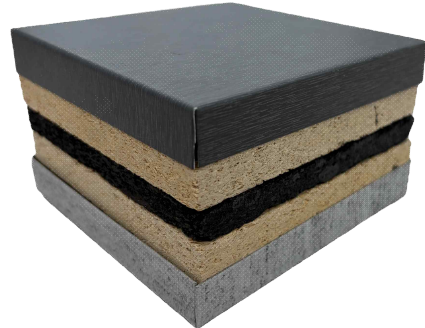
[그림 3] 화염 노출 실험 시작 전(좌), 시작 10분 후(우)

이와 같은 기초 소재의 실험 결과는 왕겨 보드 단독으로도 우수한 성능을 증명하였으며 이를 기반으로 한 복합 패널을 제작할 시 더욱 향상된 다기능성을 확보할 수 있을 것이다.

4. 탄소중립 건축물을 위한 적용 방안

본 연구는 준불연 소재 및 단열 소재를 담당하는 왕겨 보드와 불연 소재인 탄화 왕겨 보드를 결합한 다기능 왕겨 패널을 단열 성능, 구조적 강도 및 내화성의 동시 구현에 주목하였다. 기존 단일 가공법에서는 다공성 구조가 보존된 왕겨 보드는 단열성능 확보에 유리하지만 유기물의 특성상 고온에서의 혼소 가능성과 습

기에 의한 부패 우려 등 구조적/위생적 불안정성을 안고 있다. 반면 탄화 왕겨를 압축하여 제작한 보드는 가연성 성분이 제거되어 탁월한 내화성능을 가지고 습기에 강하지만 내구성과 단열성능이 떨어진다.



[그림 4] 왕겨 기반 다기능 샌드위치 패널

그림 4와 같이 각 단열성능을 담당하는 왕겨 보드와 내화성이 우수한 탄화 왕겨 보드를 결합한 구조를 제안한다. 양쪽 외곽 층에는 왕겨 보드를 배치하여 고성능 단열막을 형성하고, 가연성 성분이 제거된 탄화 왕겨 보드를 중심에 배치하여 패널 내부 습도 조절을 담당하는 동시에 방화대를 구축하는 3중 복합 구조를 제안한다. 이러한 배치는 탄화 왕겨만을 사용한 패널 사용 시 발생하는 단열 효율 저하를 외곽 층에서 보완하는 동시에, 탄화 왕겨 보드의 조습성과 내화성능을 통해 왕겨 보드의 단점을 상쇄하는 결과를 목표로 한다. 이는 소재 개별의 불안전성을 전략적 배치를 통해 극복함으로써 탄소 저감 및 화재 안전을 동시에 확보할 수 있는 건축자재로서의 가능성을 제시한다.

5. 결론

최근 건축 분야에서는 기존 단열재의 지속적인 화재 사고로 내화성능이 과제로 부상하고 있다. 이에 본 논문에서는 왕겨의 고효율 단열성과 탄화 왕겨의 우수한 내화성을 결합한 다기능 샌드위치 패널을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 왕겨 기반 다기능 샌드위치 패널은 앞서 제기된 기존 단열재들의 한계를 구조적으로 해결함으로써 다음과 같은 성과를 창출할 것으로 기대된다.

중심부에 배치된 탄화 왕겨 보드는 실리카를 기반으로 방화대 역할을 수행하며 인명 대피를 위한 골든타임을 확보한다. 또한 우수한 조습성을 통해 습기 노출 환경에서도 자재의 처짐이나 노후화를 방지하여 장기적인 단열성능 유지를 가능하게 한다. 동시에 양 외곽층에 배치된 왕겨 보드는 다공성 구조를 바탕으로 탄화 왕겨 보드의 부족한 열전도율을 보완하여 건축물의 냉난방 성능을 확보한다. 결과적으로 본 연구에서 제시한 모델이 실제 건축 현장에 적용된다면 건축물 화재 시 화염 확산 방지와 인명 피해 최소화에 기여할 뿐만 아니라, 고기능성 건축 자재로서의 활용 가능하다.

향후 본 논문에서 제시한 왕겨 기반 다기능 샌드위치 패널로 모형을 제작하여 화재 안전 기준인 KS F ISO 13784-1에 따른 실물모형 시험을 거쳐 내화성능을 검증하고, 왕겨 보드와 탄화 왕겨 보드의 계면 부착 강도와 장기적인 단열성능 및 변형에 대한 데이터를 확보해야 한다. 추가로 대량생산을 위한 국내 농업 부산물의 수급 안정성을 고려한 경제성 분석과 왕겨 패널 제작 공정의 표준화 연구의 병행이 필요하다.

참고문헌

- [1] 박수영, 김대회, 임홍순, "콘칼로리미터를 사용한 샌드위치패널 연소특성에 대한 실험적 연구", 한국화재소방학회 논문지, 제20권, 제4호, pp. 33-41, 2006년.
- [2] 우정식, 양인성, 신정훈, 정동하, "2년만에 또... 공장 화재 '판박이 참사'", 조선일보, 2026.03.23., https://www.chosun.com/national/regional/2026/03/23/AMKOC6JZSBE CROOYWPNERQYLBY/?utm_source=naver&utm_medium=referral&utm_campaign=naver-news
- [3] 박승재, 김명호, 신현명, "왕겨 및 왕겨재의 화학적 조성 성분과 열적 특성", 바이오시스템공학, 제30권, 제4호, pp. 235-241, 2005년.
- [4] 성철권, 이연경, 김형준, "왕겨의 보온 특성과 개발도상국으로의 적용 가능성 연구", 적정기술학회지, 제3권, 제1호, pp. 35-43, 2017년.
- [5] 강찬혁, 정보경, 권영철, "국내 단열·화재안전 기준을 만족하는 건축용 단열재의 전과정평가(LCA) 비교 연구", Journal of KIAEBS, 제 19권 6호, pp. 440-452, 12월, 2025년.
- [6] 김영옥, 위승환, 김수민, "샌드위치패널 심재용 유기단열재의 연소 시 가스방출 특성 및 유효복용분량 분석", 대한건축학회 춘계학술발표대회논문집, 제 42권 1호, pp. 317-318, 4월, 2022년.
- [7] 신이철, 최정민, 박계원, 정재균, 이길용, "국토교통부 고시(제2022-84호)에 따른 샌드위치패널 유기단열재의 화재안전성능 개선에 관한 연구", 대한건축학회 추계학술발표대회논문집, 제 42권 2호, pp. 486-487, 10월, 2022년.
- [8] Seunghwan Wi, "Energy, environmental and fire resistance properties of insulation materials for high-performance building envelope systems", 연세대학교 박사학위논문, 12월, 2021년.
- [9] 김석준, "왕겨분말 강화 재활용 폴리스티렌 복합재료의 열적 및 기계적 물성", Polymer(Korea), 제44권, 제2호, pp. 192-200, 2020년.
- [10] 박세현, 최경영, 손하늘, "탄소중립 건설 재료 동향", 지반환경, 제25권, 제4호, pp. 62-65, 2024년.
- [11] 김재경, "왕겨숯을 이용한 한옥지붕의 단열성능 개선에 관한 연구", 국내석사학위논문, 전북대학교 환경대학원, 10월, 2023년.
- [12] 김광철, "구조용 단열재 개발을 위한 왕겨숯 보드의 강도적 성질에 대한 연구", 목재공학, 제45권, 제5호, pp. 511-518, 2017년.