

왕겨 및 탄화 왕겨 기반 소재의 전자기파 흡수형 차폐 적용 가능성 분석

조윤찬*, 김승한**, 최제호***, 김승환*, 진주완*

*건양대학교 재난안전소방학과, **건양대학교 방재보안학과, ***건양대학교 스마트농산업학과
e-mail:25609507@konyang.ac.kr

Analysis of the Applicability of Electromagnetic Wave Absorptive Shielding Using Rice Husk and Carbonized Rice Husk-Based Materials

Yun-Chan Cho*, Seung-Han Kim**, JeHo-Choi***, Seung-Hwan Kim*, Juan Jin*

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

요약

본 연구에서는 왕겨 기반 소재의 전자기 차폐 적용 가능성을 검토하기 위해 전자기파 차폐 메커니즘과 재료 조성 특성을 중심으로 이론적 분석을 수행하였다. 기존 전자기 차폐 구조는 금속 기반 차폐를 통해 높은 성능을 확보할 수 있으나, 중량 증가 및 비용 부담과 같은 한계를 가진다. 이에 왕겨의 주요 성분인 실리카와 탄화 과정에서 형성되는 탄소 구조에 주목하여 EMI 차폐 특성을 분석하였다. 기존 연구 결과를 바탕으로 실리카 기반 재료와 전도성 탄소 재료의 복합화가 차폐 성능 향상에 기여함을 확인하였으며, 이를 왕겨 기반 소재에 적용 가능함을 검토하였다. 또한 기존 금속 및 콘크리트 차폐 재료와의 비교를 통해 왕겨 기반 소재가 중간 수준의 차폐 성능을 가지면서 경량화 및 비용 측면에서 장점을 가질 수 있음을 확인하였다. 향후 실험적 검증을 통해 실제 차폐 성능 평가가 필요할 것으로 판단된다.

1. 서론

최근 정보통신 기술과 전자 시스템의 발전에 따라 사회 전반의 전자 의존도가 증가하고 있으며, 이에 따라 전자기파로 인한 시스템 교란 및 피해에 대한 대응 기술의 중요성이 커지고 있다. 전자기 차폐(Electromagnetic Shielding)는 전자기 간섭(Electromagnetic Interference, EMI)과 전자기펄스(Electromagnetic Pulse, EMP)와 같은 전자기 교란으로부터 전자기기 및 시스템을 보호하기 위해 전자기파를 차단하거나 감쇠시키는 기술을 의미한다[1]. 전자기 차폐 기술은 국가 기반시설 및 군사 시스템 보호를 위한 핵심 기술로 주목받고 있다. 국내에서는 2017년 금융보안원 주관으로 전자기 공격으로 인한 금융 피해를 최소화하기 위한 EMP 방호 대책 세미나가 개최되었으며, 2018년에는 군 주도의 EMP 방호체계 구축 및 전략화가 추진되었다[2, 3]. 또한, 북한의 EMP탄 및 정전폭탄과 같은 전자기 무기 개발이 진행되면서 관련 기술의 중요성이 부각되고 있다[4].

기존 EMP 방호 시설은 금속 기반의 고정형 구조로 설계되어 이동성과 운영 유연성이 제한되며, 모든 시설에 대해 약 80dB 수준의 차폐 성능을 요구하는 일관 기준은 과도한 설계를 유발한다. 또한 콘크리트 및 철강 재료의 대량 사용으로 인해 비용 증가 및

환경적 부담이 발생하며, 이러한 이유로 모든 인프라에 대한 EMP 방호 적용에는 현실적인 한계가 있다[5]. 특히 표 1과 같이 EMP 방호에 활용되는 주요 금속 재료인 구리(1,938만 원), 알루미늄(528만 원), 철(162만 원)은 높은 가격대를 형성하고 있으며, 전기·전자 산업에서의 수요까지 반영되어 비용 부담을 더욱 증가시키는 요인으로 작용한다[6].

[표 1] 전자기 차폐 시설 주요 재료 가격[6]

(단위: USD/t)

일자	Cu	Al	Pb	Fe
2026.04.20	13,163	3,590	1,932	1,102

이러한 한계를 극복하기 위해서는 기존의 금속 중심 차폐 구조를 보완할 수 있는 저비용·친환경 소재 기반의 새로운 접근이 요구된다. 특히 전자기파를 단순히 반사하는 방식이 아닌, 재료 내부에서 에너지를 감쇠시키는 흡수형 차폐 메커니즘의 적용이 중요하다. 이러한 흡수형 차폐 메커니즘은 주로 EMI 차폐 이론에 기반하며, 유전 손실, 전도 손실 및 다중 반사 효과를 통해 전자기파를 감쇠시키는 방식으로 작동한다[5].

농업 부산물인 왕겨는 약 16% 수준의 회분을 포함하며, 탄화

과정에서 생성되는 왕겨재는 90% 이상의 실리카(SiO₂)를 포함하는 것으로 보고되었다[7]. 또한 왕겨는 실리카 기반 외피와 섬유질 내부 구조로 이루어진 다공성 구조를 가지며, 이러한 특성은 전자기파의 유전 손실 및 다중 반사를 유도하여 에너지 감쇠에 기여할 수 있다[7]. 따라서 왕겨 기반 소재는 EMI 차폐 메커니즘에 기반한 흡수형 차폐 소재로 활용 가능성이 있으며, 이를 EMP 방호 구조에 적용할 경우 기존 금속 중심 차폐 구조를 보완할 수 있을 것으로 기대된다.

이에 본 논문에서는 왕겨 및 탄화 왕겨의 성분·구조적 특성을 EMI 차폐 메커니즘과 연계하여 분석하고, 왕겨 기반 복합 패널이 기존 금속 중심 차폐 구조를 보완하는 흡수형 차폐 소재로 활용 가능성을 이론적으로 검토하고자 한다.

2. EMI·EMP 차폐 및 왕겨 성분 분석

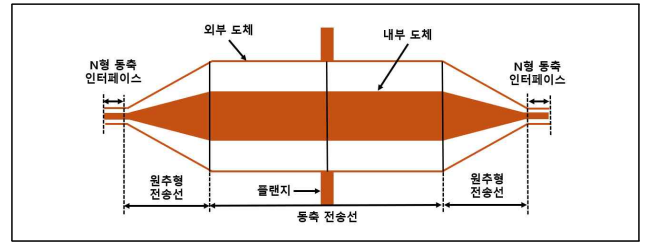
2.1 EMI 메커니즘 및 전자기 차폐 평가 분석

전자기 간섭(Electromagnetic Interference, EMI)은 외부 전자기파로 인해 전자기기의 성능 저하 또는 오작동이 발생하는 현상으로, 이를 방지하기 위해 전자기 차폐 기술이 적용된다[9]. EMI 차폐는 전자기파의 반사, 흡수 및 다중 반사 메커니즘에 의해 이루어지며, 반사는 금속과 같은 고전도성 재료에서 주로 발생하고, 흡수는 재료 내부에서 전자기 에너지가 열로 변환되는 과정으로 나타난다[10]. 특히 흡수 과정에서는 유전 손실과 전도 손실이 주요하게 작용하며, 다공성 구조는 내부 계면 증가를 통해 전자기파의 다중 반사 및 산란을 유도하여 감쇠 효과를 향상시키는 것으로 알려져 있다[9].

전자기 차폐 성능은 차폐효과(Shielding Effectiveness, SE)를 기준으로 평가되며, 이는 차폐 구조 유무에 따른 전자기파 수신 신호의 차이를 로그 스케일(dB)로 나타낸 값이다. 차폐효과는 주파수 대역에 따라 자기장 영역과 평면파 영역으로 구분하여 평가된다[9]. 재료 단위의 차폐 성능 평가는 ASTM D4935 표준을 기반으로 수행되며, 동축 전송선 구조를 이용하여 평판 시편의 차폐효과를 측정한다. 그림 1은 ASTM D4935 시험구조의 단면도를 나타낸 것이다. 이때 임피던스 정합이 중요하며, 반사손실에 따른 측정 오차가 발생할 수 있다[9,13].

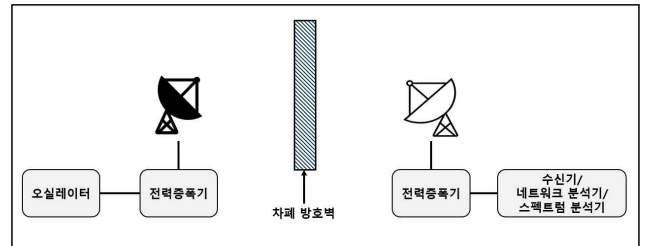
EMP(Electromagnetic Pulse)는 순간적으로 발생하는 고출력 전자기파로서, 전자기기 및 시스템에 심각한 영향을 미칠 수 있는 전자기 교란 현상이다. EMP 방호 기술은 이러한 고출력 전자기파의 유입을 차단하기 위해 도전성을 가지는 금속 구조를 기반으로 한 차폐 시스템으로 구성되며, 일반적으로 금속판을 이용한 차폐 구조를

통해 전자기파의 침투를 억제한다[9].



[그림 1] ASTM D4935 시험 구조[9]

차폐효과 측정을 위해서는 송신 안테나를 방호시설 외부에 배치하고 수신 안테나를 내부에 배치하는 방식이 사용되며, 이는 IEEE Std 299 및 MIL-STD-188-125-1에서 규정된 시험 방법에 기반한다[11,12]. 다음 그림 2는 EMP 차폐효과 측정 구성을 나타낸 것이다.



[그림 2] EMP 차폐 성능 측정 구성[9]

전자기 차폐 성능은 반사 중심의 전도성 재료뿐만 아니라 유전 손실, 전도 손실 및 다중 반사 효과가 복합적으로 작용하는 흡수형 메커니즘에 의해 향상될 수 있다. 특히 다공성 구조 및 유전 특성을 가지는 재료는 전자기파 내부 감쇠를 유도할 수 있는 특성을 가지며, 이는 기존 금속 중심의 반사형 차폐 구조를 보완할 수 있는 대안으로 활용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 흡수형 차폐 메커니즘에 주목하여, 왕겨 기반 소재의 전자기 차폐 특성을 분석하고 전자기 차폐 적용 가능성을 검토하고자 한다.

2.2 왕겨 성분 분석 및 EMI 특성 분석

왕겨는 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스 및 리그닌으로 구성되었으며, 비교적 높은 무기물 함량을 가지는 특징이 있다[6]. 아래 표 2는 왕겨의 화학적 조성을 나타낸 것으로, 약 13% 수준의 회분과 함께 탄소 약 39%, 산소 약 30% 이상의 조성을 가지는 것으로 나타났다[7].

[표 2] 왕겨의 화학적 조성[7]
(단위: 중량기준, %)

구분	회분	수분	탄소	수소	질소	황	산소
왕겨	13.15	12.08	39.09	5.44	0.50	0.005	29.69

왕겨를 탄화할 경우 무기 성분의 비율이 크게 증가하며, 아래 표 3과 같이 약 93% 수준의 실리카(SiO₂)를 포함하는 것으로 나타났다[7]. 이는 왕겨 내 무기 성분의 대부분을 실리카가 차지함을 의미하며, 실리카 기반 재료로서의 활용 가능성을 보여준다.

[표 3] 탄화 왕겨의 화학적 조성[7]
(단위: 중량기준, %)

구분	SiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	기타
탄화 왕겨	92.92	0.224	0.240	0.996	2.142	0.342	3.136

왕겨의 열적 특성에 따르면 약 250°C 부근에서 열분해가 시작되고, 350°C 부근에서 급격한 분해가 진행되며, 이 과정에서 탄소 기반 구조가 형성된다[7]. 또한 왕겨는 외피에 실리카가 집중적으로 분포하고 내부는 섬유질 기반의 다공성 구조를 형성하는 특징을 가진다[8].

이러한 성분 및 구조적 특징은 전자기 차폐 메커니즘과 밀접한 관련이 있다. 실리카는 유전체 특성에 의해 전자기파의 유전 손실을 유도할 수 있으며, 탄화 과정에서 형성되는 탄소 구조는 전도 손실에 기여할 수 있다. 또한 다공성 구조는 전자기파의 다중 반사 및 산란을 유도하여 에너지 감쇠를 증가시키는 역할을 한다[9].

따라서 왕겨는 실리카 기반 유전 특성, 탄소 기반 전도 특성과 다공성 구조를 동시에 가지는 재료로서, 전자기파 흡수형 차폐 소재로 활용될 가능성을 가진다.

3. 왕겨 기반 소재의 EMI 흡수형 차폐 특성

3.1 기존 전자기 차폐 구조의 한계

기존 전자기 차폐(Electromagnetic Shielding) 기술은 외부 전자기파의 유입을 차단하기 위해 금속 기반 차폐 구조를 중심으로 설계되어 왔으며, Faraday cage 개념을 기반으로 전자기파를 반사하는 방식으로 동작한다[10, 12].

그러나 이러한 금속 중심 차폐 구조는 여러 가지 한계를 가진다. 우선, 높은 차폐 성능 확보를 위해 두꺼운 금속판과 정밀한 접합 구조가 요구되어 구조물의 중량 증가

및 시공 복잡성이 증가한다. 또한 관통부 및 접합부 설계에 따른 시공 비용 상승과 유지관리의 어려움이 발생한다[10].

특히 금속 기반 차폐는 전자기파를 반사하는 방식에 의존하기 때문에 반사파에 의한 간섭 가능성이 존재하며, 고출력 환경에서 에너지 분산 측면에서 비효율적인 구조로 작용할 수 있다[12]. 또한 고정형 구조 중심으로 설계되어 이동성 및 확장성이 제한되고, 과도한 차폐설계로 인한 비용 대비 효율성이 저하되는 문제가 있다[10,12].

따라서 기존 금속 기반 EMP 방호 구조는 환경, 비용, 반사 중심 차폐, 적용 유연성 측면에서 한계를 가지며, 이를 보완할 수 있는 새로운 차폐 구조 및 소재 적용이 요구된다.

3.2 왕겨 기반 소재의 EMI 흡수형 차폐 특성 및 적용 가능성

본 연구에서는 왕겨의 주요 구성 성분인 실리카(SiO₂)를 중심으로 전자기파 차폐 특성을 이론적으로 분석하였다. 전자기 차폐 성능은 재료의 전도성, 유전 특성 및 구조적 특성에 의해 결정되며, 반사, 흡수 및 다중 반사 메커니즘이 복합적으로 작용한다[9].

실리카는 전기전도도가 낮아 전자기파에 대해 높은 투과 특성을 가지지만 전도성 탄소 재료를 첨가할 경우 전도도 증가에 따라 EMI 차폐 성능이 크게 향상되는 것으로 나타났다. 특히 다중탄소나노튜브가 포함된 실리카 복합재의 경우, 탄소 함량 증가에 따라 전도도가 약 6.49×10^{-14} 에서 0.574 S/m까지 증가하며, 차폐효과 또한 약 7dB에서 최대 66dB까지 증가하는 것으로 확인되었다[15].

[표 4] 탄소 함량에 따른 전도도 및 차폐효과 변화[15]

탄소 함량 (vol.%)	전도도 (S/m)	SE (10 GHz, dB)	SE (34 GHz, dB)
2.5	6.49×10^{-14}	7	12
5	0.04	22	41
10	0.574	32	66

[표 5] 재료별 전자기파 차폐 성능 비교[10-12]

재료	차폐효과 (SE, dB)	주요 메커니즘	참고 문헌
알루미늄/금속	80~120	반사	IEEE Std 299 MIL-STD-188-125-1
납	60~100	반사	MIL-STD-188-125-1
콘크리트	7~15	복합 (흡수+반사)	서만중 외, 2014

위 표 5와 같이 금속 기반 재료는 높은 차폐 성능을 가지지만 중량 및 비용 측면에서 한계를 가지며, 콘크리트와 같은 구조 재료는 차폐 성능이 제한적인 특징을 가진다. 반면, 전도성 탄소 재료가 포함된 복합 구조는 중간 수준 이상의 EMI 차폐 성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다[10-12].

이러한 결과를 바탕으로 왕겨 기반 소재를 분석하면, 왕겨는 높은 실리카 함량에 의해 유전 손실과 다공성 구조에 의한 다중 반사 효과가 작용하는 반면 전도성이 낮아 차폐 성능은 제한적인 것으로 예상된다. 그러나 탄화 과정을 통해 형성되는 탄소 구조는 전도성을 증가시켜 전도 손실과 유전 손실이 동시에 작용하는 복합 차폐 메커니즘을 형성할 수 있으며, 이는 기존 탄소-실리카 복합재와 유사한 차폐 메커니즘을 나타낼 가능성을 시사한다.

이에 왕겨 기반 소재는 금속 기반 차폐 구조 대비 경량화 및 비용 절감 측면에서 장점을 가지며, 탄화 또는 복합 구조 적용을 통해 기존 차폐 재료를 보완할 수 있는 흡수형 차폐 소재로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 이는 기존 반사 중심 차폐 구조와 달리, 에너지 감쇠 기반의 흡수형 차폐 메커니즘을 구현할 수 있는 잠재적 소재임을 시사한다.

4. 결론 및 시사점

본 논문에서는 왕겨 기반 소재의 전자기 차폐 적용 가능성을 검토하기 위해, 재료 조성 특성과 전자기 간섭(EMI) 차폐 메커니즘을 중심으로 이론적 분석을 수행하였다. 기존 EMP 방호 구조는 금속 기반 차폐를 통해 높은 차폐 성능을 확보할 수 있으나, 시공 비용 증가 및 반사 중심 차폐 방식에 따른 구조적 한계를 가지는 것으로 나타났다.

분석 결과, 왕겨는 높은 실리카 함량에 따른 유전 손실과 다공성 구조에 의한 다중 반사 효과를 통해 전자기파 감쇠에 기여할 수 있는 특성을 가지는 것으로 나타났다. 또한 탄화 과정에서 형성되는 탄소 구조는 전도성을 증가시켜 전도 손실과 유전 손실이 동시에 작용하는 복합 EMI 차폐 메커니즘을 형성할 수 있으며, 이는 기존 탄소-실리카 복합재와 유사한 차폐 성능 향상 가능성을 가지는 것으로 판단된다.

특히 기존 차폐 재료와의 비교를 통해, 왕겨 기반 소재는 금속 기반 고성능 차폐 구조와 저성능 구조 재료 사이에서 경량화 및 비용 효율성을 확보할 수 있는 중간 수준의 차폐 소재로서 활용 가능성을 가지는 것으로 나타났다.

따라서 왕겨 기반 소재는 EMI 차폐 메커니즘에 기반한 흡수형 차폐 소재로서, 기존 금속 중심의 반사형 EMP 방호 구조를 보완할 수 있는 대안으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

향후 연구에서는 일반 왕겨, 탄화 왕겨, 왕겨-탄소 복합 패널 등 시편 유형별로 ASTM D4935 기반 EMI 차폐효과를 측정하고, 주파수 대역별 SE 값, 두께 변화, 밀도 변화, 탄화 조건 및 바인더 조성에 따른 차폐 성능 변화를 비교할 필요가 있다. 또한 EMP 방호 적용 가능성을 검토하기 위해서는 재료 단위 성능뿐 아니라 접합부, 관통부, 접지 구조 및 패널 연속성을 고려한 구조체 수준의 검증이 병행되어야 한다.

참고문헌

- [1] Nurettin Sezer, "Superparamagnetic nanoarchitectures: Multimodal functionalities and applications", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 제 538권, 11월, 2021년
- [2] 이상일, "금융제도개선특별위원회, 금융권 EMP 방호대책 세미나 개최", *디지털데일리*, 13일, 11월, 2017년.
- [3] 국방부, "2018 국방정보화 콘퍼런스 개최", *국방부 보도자료*, 28일, 11월, 2018년.
- [4] 안윤석, "北 EMP탄-정전폭탄 등 시험 진행...표적지역 초강력 밀도로 초토화확증", *SPN 서울평양뉴스*, 9일, 4월, 2026년.
- [5] Kukjoo Kim, "Feasibility Study on the Development of a Deployable Tactical EMP Tent for a Sustainable Military Facility", *MDPI*, 22일, 12월, 2020년.
- [6] 한국비철금속협회, *통계정보, LME시세*, 20일, 4월, 2026년
- [7] 박승제, "왕겨 및 왕겨재의 화학적 조성 성분과 열적 특성", *바이오시스템공학*, 제30권 4호, pp.235-241, 1월, 2005년.
- [8] 성용주, "왕겨의 화학적 조성 및 왕겨섬유의 형태적 특징", *펠프·종이기술*, 제 41권 3호, pp. 235-241, 9월, 2009년.
- [9] 이찬중, "낮은 반사손실을 갖는 ASTM D4935 지그 설계", *한국전자과학회논문지*, pp. 567-570, 6월, 2020년.
- [10] 서만중, "EMP 방호시설의 전자파 차폐효과 측정 방법", *한국전자과학회논문지*, pp. 548-558, 제 25권 5호, 5월, 2014년.
- [11] IEEE Std 299-2006, Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures.
- [12] MIL-STD-188-125-1, HEMP Protection for Ground-Based Facilities.
- [13] ASTM D4935-18, Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials.
- [14] 박승제, "우리나라 왕겨 및 왕겨재의 화학적 조성 성분", *한국농업기계학회 학술발표논문집*, pp. 307-312, 1월, 1999년.
- [15] Changshu Xiang, "Electromagnetic interference shielding effectiveness of multiwalled carbon nanotube reinforced fused silica composites", *Ceramics International*, 제 33권 7호, pp. 1293-1297, 9월, 2006년.