

가축 사료 내 곰팡이독소의 발생과 완화 전략

김나연 · 이상인*

경북대학교 축산BT학과

Occurrence and mitigation strategies of mycotoxins in livestock feed

Na Yeon Kim and Sang In Lee*

Department of Animal Science and Biotechnology, Kyungpook National University, Sangju 37224, Korea

Received: Sep 15, 2023
Revised: Sep 30, 2023
Accepted: Oct 11, 2023

*Corresponding author

Sang In Lee
Department of Animal Science and
Biotechnology, Kyungpook National
University, Sangju 37224, Korea
Tel: +82-54-530-1943
E-mail: silee78@knu.ac.krCopyright © 2023 Korean Society of
Animal Science and Technology.
This is an Open Access article
distributed under the terms of the
Creative Commons Attribution
Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>)
which permits unrestricted
non-commercial use, distribution,
and reproduction in any medium,
provided the original work is properly
cited.

ORCID

Na Yeon Kim
<https://orcid.org/0009-0004-2727-1246>
Sang In Lee
<https://orcid.org/0009-0007-8971-3400>

Abstract

The widely distributed mycotoxins are secondary metabolites produced by specific types of fungi. These toxins are commonly found in grains and livestock feed, posing a threat to the health of both livestock and humans. Particularly, research on the types and effects of mycotoxins in feed emphasizes the importance of corresponding strategies. While various strategies have been investigated to reduce the toxicity of mycotoxins, many challenges remain. This research summarizes not only the types of mycotoxins in feed and their effects on livestock but also the advantages and disadvantages of various mitigation strategies.

Keywords: Mycotoxin, Feed, Livestock healthy, Treatment strategy

서론

세계적으로 널리 퍼져 있는 곰팡이독소는 특정 종류의 곰팡이가 생산하는 독성 화합물이다. 이 독소들은 주로 따뜻하고 습한 환경에서 번성하며, 작물과 사료를 오염시킬 수 있다. 최근의 기후 변화인 지구 온난화 등은 곰팡이독소 발생 증가를 야기했다[1]. 이러한 독소들은 작물과 가축에 심각한 위협을 가하며, 가축의 건강과 생산성을 저해한다. 곰팡이독소에 노출되면 가축의 소화, 신경계, 호흡 및 생식기 기능을 해치는 동시에 면역 체계를 약화시켜 감염성 질병 발병 위험을 증가시킨다[2].

지난 수십 년간 곰팡이독소를 통제하기 위한 강력한 연구가 이루어졌다. 그 중 하나는 독소 결합제의 사용인데, 이는 효과적으로 곰팡이독소를 제거하지만, 필수 영양소를 결합하여 영양 결핍을 일으킬 수 있다[3]. 따라서 친환경적이고 혁신적인 기술에 대한 연구가 필요하다.

이 연구는 곰팡이독소에 대한 소개와 가축에 미치는 영향을 살펴보고 여러 해독 전략의 장단점을 분석한다. 이는 가축의 건강과 생산성을 보호하기 위한 관리 방법의 중요성을 강조하며, 곰팡이독소가 가축에 미치는 영향을 완화하기 위한 전략 탐색에 기여할 것으로 예상된다.

Competing interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Funding sources

Not applicable.

Acknowledgements

Not applicable.

Availability of data and material

Upon reasonable request, the datasets of this study can be available from the corresponding author.

Authors' contributions

Conceptualization: Lee SI.
Writing - original draft: Kim NY.
Writing - review & editing: Kim NY, Lee SI.

Ethics approval and consent to participate

This article does not require IRB/ IACUC approval because there are no human and animal participants.

곰팡이독소 오염의 발생 현황과 조건

발생 현황

최근 연구에 따르면 약 10만 종의 곰팡이가 식별되었는데, 이 가운데 약 500종은 잠재적으로 유독한 곰팡이독소를 생산할 수 있다고 보고되고 있다. 인간과 가축 건강에 영향을 미치는 주요 곰팡이독소로는 제랄레논(ZEA, zearalenone), 데옥시니발레놀(DON, deoxynivalenol), 아플라톡신(AF, aflatoxin), 오크라톡신 A(OTA, ochratoxin A), 그리고 퓨모니신(FUM, fumonisin)이 있다 [4]. 게다가 최근 연구에 의하면 곰팡이가 동시에 여러 종류의 곰팡이독소를 생성할 수 있어, 곰팡이독소에 빠르고 지속적으로 감염될 수 있다는 가능성이 있다[5]. 식품 및 농업 기구(FAO, Food and Agriculture Organization)와 세계 보건 기구(WHO, World Health Organization)가 실시한 리뷰에 따르면, 견과류, 곡물 및 쌀 등 전 세계적으로 재배되는 작물의 약 25%가 곰팡이독소로 오염되어 있다고 추정되고 있다[6].

발생 조건

곰팡이독소의 발생은 다양한 요인에 영향을 받는다. 곰팡이는 어디에서나 존재하기 때문에, 곰팡이독소는 수확 전, 수확 시, 그리고 수확 후와 같은 작물 성장 및 저장의 여러 단계에서 생성될 수 있다[7]. 이에는 온도 및 습도와 같은 기후 요소가 포함돼 있는데, 이는 곰팡이 성장과 곰팡이독소 생성을 조절하는 핵심 측면이다. 또한 pH, 미량 영양소의 생물학적 이용 가능성, 그리고 해충 피해도 중요하다. 게다가 지리적 위치, 농업 관행, 수확 시기, 저장 기간 및 조건은 모두 오염 정도를 결정하는 데 중요한 역할을 한다[8]. 특히, 곰팡이독소는 부적절한 건조 조건과 따뜻하고 습한 보관 환경에서 주로 발생한다. 또한, 가뭄, 홍수, 해충 침입 및 수확 지연과 같은 스트레스 조건 아래에서 오염이 증가할 수 있다[9].

지구 온난화(지구 온난화로 인한 발병률 증가)

지구 온난화로 인한 기후 변화는 지난 수십 년간 전 세계적으로 우려되는 문제였다. 기후 패턴의 변화와 이에 따른 지구 온도 상승은 식량 안보와 식품 안전에 상당한 영향을 미치고 있다 [10]. 연구에 따르면 이러한 기후 변화의 영향으로 이산화탄소 농도의 증가, 환경 온도 상승, 그리고 극심한 가뭄과 폭우의 상호 작용 등이 곰팡이의 성장과 곰팡이독소 발생에 상당한 영향을 미친다고 알려져 있다[11]. 예를 들어, 기후 변화의 영향은 세르비아에서 관측되었는데, 이전에 오염되지 않았던 옥수수가 최근 장기간에 걸친 고온과 건조한 날씨로 69%가 곰팡이독소로 오염된 것으로 나타났다[12]. 이는 곰팡이독소 오염 수준이 정상보다 낮더라도 기후 이상으로 인해 위험한 수준에 도달할 수 있다는 점을 강조한다[13]. 따라서 기후 변화에 의한 스트레스는 이전에 보지 못한 새로운 곰팡이독소의 발생이나 인식되지 않았던 지역으로의 이주를 초래할 수 있다[10]. 이러한 이유로 곰팡이독소 오염의 예방과 완화를 위해 지속적인 모니터링과 연구 노력이 필요하다.

주요 곰팡이독소

곰팡이독소는 주로 *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria*, *Fusarium*, 그리고 *Claviceps* 와 같은 다양한 곰팡이 속에서 생산된다. 식품에서 가장 많이 발견되는 곰팡이독소 그룹은 다음 네 가지 곰팡이 속에서 생산된다. 아플라톡신은 *Aspergillus* 종에 의해 생산되며, 오크라톡신 A는 *Aspergillus*와

*Penicillium*에 의해 생산된다. 데옥시니발레놀, 제랄레논, 퓨모니신 B1 및 B2는 주로 *Fusarium* 종에 의해 생산된다[14]. 이러한 독소들은 가축 사료에 계속 남아있어 가축 건강에 부정적인 영향을 미치고 있다. 게다가, 화학적 및 열 안정성 때문에, 그들은 우유, 고기, 달걀, 가공 식품과 같은 식용 동물 제품에도 남아있을 수 있어, 잠재적으로 가축 및 인간 건강에 장기적인 부정적인 영향을 줄 수 있다[15].

제랄레논

제랄레논(ZEA)은 주로 *Fusarium* 속의 곰팡이(주로 *Fusarium graminearum*, *F. culmorum*, *F. cerealis*, *F. equiseti*, *F. crookwellense*, *F. semitectum*, *F. verticillioides*, *F. sporotrichioides*, *F. oxysporum* 및 *F. acuminatum*)에 의해 생산되는 비스테로이드 에스트로겐 곰팡이독소이다. ZEA는 밀, 보리, 옥수수, 수수, 호밀, 쌀, 옥수수 사일리지, 참깨, 건초, 밀가루, 맥주, 콩 등 다양한 곡물에서 자주 발견된다[16]. ZEA의 생물에 대한 주요한 진입 경로는 오염된 음식을 섭취하는 것이다. 경구 노출 후 ZEA는 소화기관을 통해 빠르게 흡수된다[17]. 가축에서 ZEA 노출은 면역 독성, 간 독성 및 혈액 독성을 유발할 수 있다[16]. 또한, ZEA의 강한 에스트로겐 및 에스트로겐과 유사한 효과는 암컷에서 생식기 질환(불임 또는 생식 능력 감소), 질 탈장, 외음부 부종 및 유방 비대를 유발할 수 있다. 또한 수컷의 고환 위축 및 유두 부어오름을 유발할 수도 있다[18]. 시험관 내에서 ZEA는 유전 독성을 유발하여 DNA 부가물을 형성하고, DNA 단편화, 미세 핵 형성, 염색체 이상, 세포 증식 및 세포 사멸을 유발할 수 있다[17].

데옥시니발레놀

데옥시니발레놀(DON)은 곰팡이에 의해 생산되는 독성 2차 대사산물로, 밀, 옥수수, 보리 등 다양한 작물을 오염시키고 있다. DON의 전 세계적인 오염은 주로 *F. graminearum*, *F. asiaticum*, 그리고 *F. culmorum*과 같은 곰팡이에 의해 발생한다[19]. DON은 주로 위장관에서 독성을 나타내고 있다[20]. 최근 연구에 따르면, DON에 노출되면 염증 반응을 조절하는 사이토카인과 관련된 유전자에 영향을 미친다는 것이 확인됐다. 또한, 영양물 운반, 장 장벽 기능, 세포 주기 조절 및 미토콘드리아 기능과 관련된 유전자의 발현이 방해되어, 가축에서 기능 장애를 일으킬 수 있다는 증거가 있다[21].

아플라톡신

아플라톡신(AF)은 곰팡이가 생산하는 2차 대사산물로 알려져 있는 곰팡이독소다[22]. *Aspergillus* 속의 곰팡이, 특히 *A. flavus*에 의해 생산된다. *A. flavus*는 토양에서 만연하게 발견되며 세계적으로 쌀, 옥수수, 땅콩 등 다양한 작물을 오염시킨다. 이러한 식품 원료를 숙주로 설정한 후, *A. flavus*는 아플라톡신 B1(AFB1)을 포함한 AF를 생산하여 식품을 오염시킨다. AF는 수확 전이나 수확 후에 언제든지 음식에 발생할 수 있어, 오염 통제를 어렵게 만든다[23]. 현재까지 18종 이상의 AF이 발견됐지만, 가장 흔하고 중요한 것은 아플라톡신 B1, B2, G1, G2이다[22]. AF에 노출되면 DNA 손상, 암, 발육 이상을 유발하여 인간과 가축의 생리적 상태에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 또한, AF에 장기간 노출되면 생명에 위협을 가하고, 주로 간 손상을 일으키는 급성 중독인 아플라톡신증을 유발할 수 있다[24].

오크라톡신

오크라톡신 A(OTA)은 전 세계적으로 곡물부터 건조과일, 와인, 그리고 커피와 같은 다양한

농산물에서 발견되는 자연 발생 식품 매개 곰팡이독소이다. 이것은 *A. ochraceus*, *A. carbonarius*, *A. niger*, 그리고 *Penicillium verrucosum*과 같은 다양한 곰팡이에 의해 생산된다[25]. 이전 연구에서 OTA에 노출되면 대기관 독성을 일으킬 수 있음이 확인되었지만, 신장이 OTA의 주요 표적 기관이다[26]. 신장에서 OTA의 독성 효과는 세뇨관 분해, 세포 사멸, 근위곡세뇨관의 재흡수 장애 및 신장 세포에서 핵-세포질 비율 증가를 특징으로 합니다. 또한, OTA의 가장 관련성 있는 독성 효과는 단백질 합성 억제다. 다른 중요한 효과로는 지질 과산화, DNA 손상, 그리고 산화 스트레스가 있다[27].

퓨모니신

퓨모니신(FUM)은 다양한 기질에서 성장할 수 있는 *F. verticillioides*에 의해 생산되는 수용성 대사 곰팡이독소다. FUM는 FA1, FA2, FA3, PHFA3a, PHFA3b, HFA3, FAK1, FBK1, FB1, Iso-FB1, PHFB1a, PHFB1b, HFB1, FB2, FB3, FB4, FB5, FC1, N-acetyl-FC1, Iso-FC1, N-acetyl-iso-FC1, OH-FC1, N-acetyl-OH-FC1, FC3, FC4, FP1, FP2, 그리고 FP3를 포함한 28가지 아날로그로 구성된다. 현재까지 발견된 다양한 FUM 중에서 퓨모니신 B1(FB1)이 주요 성분이자 가장 흔한 오염 물질이다[28]. FUM은 주로 옥수수과 옥수수 기반의 식품 또는 사료 제품에서 발견된다. 가축이 FB1을 함유한 사료를 섭취하면 폐 부종, 흉막 삼출, 그리고 백질 뇌연화증과 같은 신체적 손상을 경험할 수 있다[29].

가축 건강과 생산성에 미치는 곰팡이독소의 영향

가축은 주로 사료 섭취를 통해 곰팡이독소에 노출될 수 있는데, 이는 대부분 섭취를 통해 이루어진다. 곰팡이독소는 가축 사료에서 종종 농도가 높게 발견되며, 소화관을 통해 흡수된 후 혈류에 순환되어 간, 신장 등 다양한 장기에 영향을 미친다[12,30]. 특히, 간은 곰팡이독소를 해독하는 데 역할을 하지만, 장기간 노출되면 간 기능이 저하되고 독성 물질이 다른 장기로 빠르게 전파될 수 있다. 결과적으로, 곰팡이독소 노출은 가축의 건강에 심각한 위협을 줄 수 있으며, 장기간 노출은 만성 질병 발병 위험을 증가시킨다[31]. 따라서 곰팡이독소의 효과적인 관리는 가축의 건강과 생산성을 보호하기 위해 중요하다.

소화계 증상

가축은 곰팡이독소 노출로 인해 다양한 내장기관의 기능이 손상될 수 있다. 이로 인해 간, 신장, 심장 등과 같은 장기에 손상이 생겨 건강한 가축의 정상 기능이 방해될 수 있다[32]. 특히 곰팡이독소에 의해 소화관 조직에 손상이 생겨 가축은 설사 및 구토와 같은 소화계 증상을 경험할 수 있다. 일부 가축은 조직 손상으로 인해 위장관 출혈을 경험할 수도 있다[33,34]. 이 중에서도 설사는 영양소의 흡수가 감소하고, 영양소가 제대로 소화되지 않아 생기는 체액과 전해질의 손실로 인해 가축의 건강과 영양소 흡수에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 더 나아가 곰팡이독소는 장에 염증을 일으키고 구토를 유발할 수 있다[35]. 그 결과, 곰팡이독소에 노출된 가축은 영양소 흡수가 저하되어 영양 결핍의 가능성이 높아지며, 일부는 비만을 경험할 수도 있다[36].

신경계 증상

곰팡이독소에 노출된 가축은 신경계에 부정적인 영향을 받을 수 있다[37]. 따라서 가축은 신경통과 근육 약화와 같은 증상을 경험할 수 있다. 신경통은 가축의 움직임과 걷기에 어려움을

초래하여 일상 활동과 행동에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 또한, 근육 약화는 가축의 움직임을 제한하고, 식욕 감소와 활동 수준 감소와 같은 건강 문제를 유발할 수 있다[38].

호흡계 증상

곰팡이독소에 노출된 가축은 호흡기 질환을 유발할 수 있어, 이는 기침과 같은 증상을 일으킬 수 있다[39]. 호흡기 질환은 폐에 염증을 유발하여 기침을 일으키고 가축의 호흡기 건강을 심각하게 해칠 수 있다. 보다 심각한 경우, 호흡기계에 손상이 생겨 호흡곤란을 경험할 수도 있어, 이는 가축의 생존에 위협이 될 수 있다[38].

피부 증상

곰팡이독소에 노출되면 가축의 피부에 가려움증이 발생할 수 있어. 이는 주로 피부에서 염증 반응이 일어나서 가축이 긁는 행동을 하게 만들어 피부 손상을 일으킬 수 있다[40]. 더 나아가, 일부 곰팡이독소는 직접 피부에 영향을 미쳐 발진과 같은 비정상적인 피부 변화를 일으킬 수 있다. 이러한 피부 발진은 가축의 피부 건강을 저해시키며, 특히 긁는 행동과 함께 상처를 일으킬 수 있어 추가 감염이나 문제를 일으킬 수 있다[41].

면역 체계 장애

가축이 곰팡이독소에 노출되면 그들의 면역 기능에 부정적인 영향을 미칠 수 있다[42]. 이 독소들은 가축의 면역 체계를 약화시키고 면역 반응을 억제할 수 있다. 결과적으로 가축은 감염에 대한 저항력이 감소하고 병원균에 민감해질 수 있다. 더욱이, 약화된 면역 기능은 건강을 유지하는 데 필요한 충분한 항체 반응을 유발하지 못하게 하여 감염성 질환에 대한 방어 능력을 저해할 수 있다[43]. 그러므로 면역 체계의 손상은 가축의 전체적인 건강에 위협을 가하고 생산성을 저하시킬 수 있어, 농장에서의 적절한 관리와 예방 조치가 필요하다[44].

성장 및 생식 기능 장애

곰팡이독소에 노출된 가축은 성장 장애와 체중 감소를 경험할 수 있다. 독소로 인한 영향으로 영양소 흡수와 대사에 문제가 생겨 성장이 방해되어 체중이 감소할 수 있다[45]. 또한, 독소로 인한 내분비계의 이상은 생식 기능에 영향을 미칠 수 있으며, 일부 가축은 생식기관에 직접적인 손상을 입을 수도 있다. 이는 생식 능력이 감소하고 번식 활동에 문제가 생길 수 있다[46]. 더욱이, 독소에 노출된 가축은 출산 능력이 저하되고 새끼의 건강에 부정적인 영향을 미쳐 수 있어 번식 프로그램에서의 가치를 줄이고 번식 결과에 부정적인 영향을 미칠 수 있다[47]. 그러므로 곰팡이독소 노출을 예방하는 것이 중요하다.

곰팡이독소 오염 완화를 위한 전략

인간과 가축의 안전을 위해 곰팡이독소 잔류물의 개선은 필수적이다. 다양한 물리적 및 화학적 해독 전략이 곰팡이독소 오염을 예방하기 위해 확립되어 왔지만, 표준을 충족하는 것은 높은 비용, 생물학적 안전 위험, 영양 품질, 제품 맛, 한정된 결합 효능 등으로 인해 어렵다[4]. 따라서 적절한 해독 방법을 개발하는 것이 인간과 가축의 건강을 위해 필수적이다.

물리적 제거

물리적 제거는 곰팡이독소가 집중된 작물이나 식품에서 곰팡이독소를 줄이는 방법으로, 영향

을 받은 부분을 수동으로 제거하거나 씻어내는 과정을 포함한다. 예를 들어, 곰팡이독소가 검출된 곡물 부분을 제거하거나 과일과 채소를 씻어 표면에 있는 독소를 제거하는 것이 이에 해당한다[48]. 물리적 제거의 주요 단점은 효율성과 철저함의 한계다. 특히, 모든 작물이나 식품 부분을 완전히 제거하거나 독소를 완전히 제거하는 것이 어려울 수 있다. 또한, 물리적 제거는 비용이 많이 들 수 있으며, 작물의 영양가나 공정의 생산성을 저해할 수 있다[49].

열처리

열처리는 열을 사용하여 곰팡이독소를 제거하는 방법을 말한다. 고온에서 곰팡이독소는 일부 또는 완전히 파괴될 수 있다. 예를 들어, 적절한 온도와 시간에 음식을 끓이거나 조리함으로써 독소를 제거할 수 있다. 열처리의 주요 단점은 일부 곰팡이독소가 고온에 저항성을 나타낼 수 있다는 것이다[50]. 게다가, 고온 처리는 음식의 품질과 영양 가치를 저하시킬 수 있으며, 경우에 따라 음식의 맛이나 질감을 변경시킬 수 있다. 특히, 단백질, 지방, 비타민과 같은 영양소가 열에 노출되면 그들의 분해로 이어질 수 있어 이는 가축 영양에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 게다가, 온도와 시간을 적절하게 통제하지 않으면 독소를 완전히 제거하기 어려울 수 있다[51].

화학적 처리

화학적 처리는 화학 물질을 사용하여 곰팡이독소를 분해하거나 중화시키는 방법을 말한다. 이러한 화학 물질은 독소와 상호 작용하여 독성을 감소시키거나 제거한다. 예를 들어, 화학 바인더를 사용하여 독소를 흡착하거나 분해하는 것이 여기에 해당한다[48]. 화학 처리의 단점은 화학 물질 자체의 독성으로, 이는 환경이나 가축에 해로울 수 있다. 게다가, 화학 처리 과정에서 생성된 부산물로 인한 잔류물이나 오염물에 대한 안전 문제도 고려해야 한다. 또한, 독소와 화학 물질 간의 상호 작용을 완전히 이해하기 어려울 수 있다[52]. 특히 화학 처리 방법 중 하나인 독소 바인더는 사료로부터 필수 미네랄과 영양소를 흡수하여 사료 전환 효율을 저하시키고 면역 억제 및 생산성 저하로 이어질 수 있다[53].

생물학적 처리

생물학적 처리는 곰팡이독소를 분해하거나 제거하기 위해 생물학적 방법을 사용하는 것을 의미한다[54]. 예를 들어, 특정 균주의 미생물을 섭취하거나 발효 과정을 통해 독소를 분해하거나 제거할 수 있다. 생물학적 처리는 종종 독소를 제거하기 위해 자연 발생하는 생물학적 과정을 활용하는 것을 목표로 한다[55]. 이러한 전략들은 곰팡이독소 오염을 완화하기 위해 널리 사용됩니다. 각 방법마다 장단점이 있기 때문에 종합적인 접근이 가장 효과적일 수 있다[56]. 생물학적 처리의 단점은 생물학적 방법의 효과에 불안정함이 있다. 특정 균주나 발효 과정이 독소를 효과적으로 분해하지 못할 수 있으며, 생물학적 처리 과정 자체가 복잡하고 예측할 수 없다. 게다가, 생물학적 처리에는 긴 처리 시간이 필요할 수 있으며 생산성이 저하될 수 있다. 또한, 이러한 과정에서 사용되는 균주나 발효 요인이 가축에게 유해할 수 있으며, 생물학적 처리가 제대로 이루어지지 않으면 가축 사료에 유해한 균주나 물질이 포함될 수 있어 가축 건강에 영향을 줄 수 있다[57].

천연 물질

최근에는 곰팡이독소 오염을 예방하고 사료, 신선한 축산물, 가공 축산물에서 잔류물을 줄이기 위한 비용이 효율적이고 비독성이며 환경 친화적인 천연 물질에 대한 관심이 높아지고 있다

[53]. 이전 연구에서 특정 천연 물질이 곰팡이독소의 생성을 효과적으로 억제하거나, 이미 생성된 독소를 중화시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 연구 결과는 천연 물질이 식품 및 사료 산업에서 곰팡이독소 오염을 관리하는 데 유용한 친환경 대안으로 기여할 수 있음을 시사한다 [58]. 따라서 곰팡이독소 오염의 증가하는 유병률을 해결하기 위해서는 천연 물질과 같은 친환경 항균제에 대한 추가 연구가 필요하다[59].

결론

가축의 유일한 에너지와 영양원은 사료다. 다양한 곰팡이독소는 영양소와 에너지의 이용을 제한하여 가축의 영양을 방해하고, 건강 위험을 초래하며 생산성을 감소시킬 수 있다. 특히 곰팡이독소는 소화기관, 간 혹은 콩팥과 같은 기관 및 시스템에 부정적인 영향을 미쳐 가축의 성장, 번식 및 면역 체계를 해칠 수 있다. 이로 인해 감염성 질병에 민감해질 수도 있다. 게다가 지구 온난화로 인해 곰팡이독소로 오염된 사료는 점점 증가하고 있다.

곰팡이독소를 완화하기 위한 다양한 방법이 있지만, 아직 불완전하고 단점이 있어서 새로운 전략을 개발할 필요가 있다.

그러므로 곰팡이독소의 발생과 독성을 완화하는 것에 대한 노력이 더 많이 집중되어야 한다. 이 중 천연 제품을 이용한 곰팡이독소 완화가 친환경적이고 혁신적인 접근 방식으로 주목을 받고 있다. 따라서 곰팡이독소 오염을 완화하기 위하여 천연 물질을 이용한 곰팡이독소 완화에 대한 연구가 필수적이다.

REFERENCES

1. Fumagalli F, Ottoboni M, Pinotti L, Cheli F. Integrated mycotoxin management system in the feed supply chain: innovative approaches. *Toxins*. 2021;13:572. <https://doi.org/10.3390/toxins13080572>
2. Loi M, Fanelli F, Liuzzi VC, Logrieco AF, Mulè G. Mycotoxin biotransformation by native and commercial enzymes: present and future perspectives. *Toxins*. 2017;9:111. <https://doi.org/10.3390/toxins9040111>
3. Vanhoutte I, Audenaert K, De Gelder L. Biodegradation of mycotoxins: tales from known and unexplored worlds. *Front Microbiol*. 2016;7:561. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00561>
4. Haque MA, Wang Y, Shen Z, Li X, Saleemi MK, He C. Mycotoxin contamination and control strategy in human, domestic animal and poultry: a review. *Microb Pathog*. 2020;142:104095. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2020.104095>
5. Santos Pereira C, Cunha SC, Fernandes JO. Prevalent mycotoxins in animal feed: occurrence and analytical methods. *Toxins*. 2019;11:290. <https://doi.org/10.3390/toxins11050290>
6. Eskola M, Kos G, Elliott CT, Hajšlová J, Mayar S, Krska R. Worldwide contamination of food-crops with mycotoxins: validity of the widely cited 'FAO estimate' of 25. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2020;60:2773-89. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1658570>
7. Anfossi L, Giovannoli C, Baggiani C. Mycotoxin detection. *Curr Opin Biotechnol*. 2016;37:120-6. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2015.11.005>
8. Magan N, Olsen M. *Mycotoxins in food: detection and control*. Burlington: Elsevier Science; 2004.
9. Aiko V, Mehta A. Occurrence, detection and detoxification of mycotoxins. *J Biosci*. 2015;40:943-54. <https://doi.org/10.1007/s12038-015-9569-6>
10. Kos J, Anić M, Radić B, Zadavec M, Hajnal EJ, Pleadin J. Climate change: a global threat

- resulting in increasing mycotoxin occurrence. *Foods*. 2023;12:2704. <https://doi.org/10.3390/foods12142704>
11. Zingales V, Taroncher M, Martino PA, Ruiz MJ, Caloni F. Climate change and effects on molds and mycotoxins. *Toxins*. 2022;14:445. <https://doi.org/10.3390/toxins14070445>
 12. Liew WPP, Mohd-Redzwan S. Mycotoxin: its impact on gut health and microbiota. *Front Cell Infect Microbiol*. 2018;8:60. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2018.00060>
 13. Streit E, Naehrer K, Rodrigues I, Schatzmayr G. Mycotoxin occurrence in feed and feed raw materials worldwide: long-term analysis with special focus on Europe and Asia. *J Sci Food Agric*. 2013;93:2892-9. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6225>
 14. Marin S, Ramos AJ, Cano-Sancho G, Sanchis V. Mycotoxins: occurrence, toxicology, and exposure assessment. *Food Chem Toxicol*. 2013;60:218-37. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.07.047>
 15. Kępińska-Pacelik J, Biel W. Alimentary risk of mycotoxins for humans and animals. *Toxins*. 2021;13:822. <https://doi.org/10.3390/toxins13110822>
 16. Ropejko K, Twarużek M. Zearalenone and its metabolites: general overview, occurrence, and toxicity. *Toxins*. 2021;13:35. <https://doi.org/10.3390/toxins13010035>
 17. Rai A, Das M, Tripathi A. Occurrence and toxicity of a *Fusarium* mycotoxin, zearalenone. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2020;60:2710-29. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1655388>
 18. Peraica M, Radić B, Lucić A, Pavlović M. Toxic effects of mycotoxins in humans. *Bull World Health Organ*. 1999;77:754-66.
 19. Sumarah MW. The deoxynivalenol challenge. *J Agric Food Chem*. 2022;70:9619-24. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c03690>
 20. Zhou H, Guog T, Dai H, Yu Y, Zhang Y, Ma L. Deoxynivalenol: toxicological profiles and perspective views for future research. *World Mycotoxin J*. 2020;13:179-88. <https://doi.org/10.3920/WMJ2019.2462>
 21. Pinto ACSM, De Pierri CR, Evangelista AG, Batista Gomes ASLP, Luciano FB. Deoxynivalenol: toxicology, degradation by bacteria, and phylogenetic analysis. *Toxins*. 2022;14:90. <https://doi.org/10.3390/toxins14020090>
 22. Shabeer S, Asad S, Jamal A, Ali A. Aflatoxin contamination, its impact and management strategies: an updated review. *Toxins*. 2022;14:307. <https://doi.org/10.3390/toxins14050307>
 23. Rushing BR, Selim MI. Aflatoxin B1: a review on metabolism, toxicity, occurrence in food, occupational exposure, and detoxification methods. *Food Chem Toxicol*. 2019;124:81-100. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.11.047>
 24. Alameri MM, Kong ASY, Aljaafari MN, Ali HA, Eid K, Sallagi MA, et al. Aflatoxin contamination: an overview on health issues, detection and management strategies. *Toxins*. 2023;15:246. <https://doi.org/10.3390/toxins15040246>
 25. Petzinger E, Ziegler K. Ochratoxin A from a toxicological perspective. *J Vet Pharmacol Ther*. 2000;23:91-8. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2885.2000.00244.x>
 26. Ding L, Han M, Wang X, Guo Y. Ochratoxin A: overview of prevention, removal, and detoxification methods. *Toxins*. 2023;15:565. <https://doi.org/10.3390/toxins15090565>
 27. Vlachou M, Pexara A, Solomakos N, Govaris A. Ochratoxin A in slaughtered pigs and pork products. *Toxins*. 2022;14:67. <https://doi.org/10.3390/toxins14020067>
 28. Chen J, Wei Z, Wang Y, Long M, Wu W, Kuca K. Fumonisin B1: mechanisms of toxicity and biological detoxification progress in animals. *Food Chem Toxicol*. 2021;149:111977. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.111977>
 29. Liu X, Fan L, Yin S, Chen H, Hu H. Molecular mechanisms of fumonisin B1-induced

- toxicities and its applications in the mechanism-based interventions. *Toxicol*. 2019;167:1-5. <https://doi.org/10.1016/j.toxicol.2019.06.009>
30. Yang C, Song G, Lim W. Effects of mycotoxin-contaminated feed on farm animals. *J Hazard Mater*. 2020;389:122087. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122087>
 31. Ekwomadu T, Mwanza M, Musekiwa A. Mycotoxin-linked mutations and cancer risk: a global health issue. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19:7754. <https://doi.org/10.3390/ijerph19137754>
 32. Jiang S, Yang Z, Yang W, Gao J, Liu F, Chen C, et al. Physiopathological effects of zearalenone in post-weaning female piglets with or without montmorillonite clay adsorbent. *Livest Sci*. 2010;131:130-6. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.02.022>
 33. Pestka JJ, Smolinski AT. Deoxynivalenol: toxicology and potential effects on humans. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev*. 2005;8:39-69. <https://doi.org/10.1080/10937400590889458>
 34. Katsuyama A, Konno T, Shimoyama S, Kikuchi H. The mycotoxin patulin decreases expression of density-enhanced phosphatase-1 by down-regulating PPAR γ in human colon cancer cells. *Tohoku J Exp Med*. 2014;233:265-74. <https://doi.org/10.1620/tjem.233.265>
 35. Vesonder RF, Ciegler A, Jensen AH. Isolation of the emetic principle from *Fusarium*-infected corn. *Appl Microbiol*. 1973;26:1008-10. <https://doi.org/10.1128/am.26.6.1008-1010.1973>
 36. Li XG, Zhu M, Chen MX, Fan HB, Fu HL, Zhou JY, et al. Acute exposure to deoxynivalenol inhibits porcine enteroid activity via suppression of the Wnt/ β -catenin pathway. *Toxicol Lett*. 2019;305:19-31. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2019.01.008>
 37. Empting LD. Neurologic and neuropsychiatric syndrome features of mold and mycotoxin exposure. *Toxicol Ind Health*. 2009;25:577-81. <https://doi.org/10.1177/0748233709348393>
 38. Ratnaseelan AM, Tsilioni I, Theoharides TC. Effects of mycotoxins on neuropsychiatric symptoms and immune processes. *Clin Ther*. 2018;40:903-17. <https://doi.org/10.1016/j.clinthera.2018.05.004>
 39. Bush RK, Portnoy JM, Saxon A, Terr AI, Wood RA. The medical effects of mold exposure. *J Allergy Clin Immunol*. 2006;117:326-33. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2005.12.001>
 40. Janik E, Niemcewicz M, Podogrocki M, Ceremuga M, Stela M, Bijak M. T-2 toxin: the most toxic trichothecene mycotoxin: metabolism, toxicity, and decontamination strategies. *Molecules*. 2021;26:6868. <https://doi.org/10.3390/molecules26226868>
 41. Pang VF, Swanson SP, Beasley VR, Buck WB, Haschek WM. The toxicity of T-2 toxin in swine following topical application: I. clinical signs, pathology, and residue concentrations. *Fundam Appl Toxicol*. 1987;9:41-9. [https://doi.org/10.1016/0272-0590\(87\)90152-7](https://doi.org/10.1016/0272-0590(87)90152-7)
 42. Obremski K. The effect of in vivo exposure to zearalenone on cytokine secretion by Th1 and Th2 lymphocytes in porcine Peyer's patches after in vitro stimulation with LPS. *Pol J Vet Sci*. 2014;17:625-32. <https://doi.org/10.2478/pjvs-2014-0093>
 43. Rasooly L, Pestka JJ. Vomitoxin-induced dysregulation of serum IgA, IgM and IgG reactive with gut bacterial and self antigens. *Food Chem Toxicol*. 1992;30:499-504. [https://doi.org/10.1016/0278-6915\(92\)90101-P](https://doi.org/10.1016/0278-6915(92)90101-P)
 44. Maresca M. From the gut to the brain: journey and pathophysiological effects of the food-associated trichothecene mycotoxin deoxynivalenol. *Toxins*. 2013;5:784-820. <https://doi.org/10.3390/toxins5040784>
 45. Smith LE, Stoltzfus RJ, Prendergast A. Food chain mycotoxin exposure, gut health, and impaired growth: a conceptual framework. *Adv Nutr*. 2012;3:526-31. <https://doi.org/10.3945/an.112.002188>
 46. Liu J, Applegate T. Zearalenone (ZEN) in livestock and poultry: dose, toxicokinetics, toxicity and estrogenicity. *Toxins*. 2020;12:377. <https://doi.org/10.3390/toxins12060377>

47. Sayyari A, Uhlig S, Fæste CK, Framstad T, Sivertsen T. Transfer of deoxynivalenol (DON) through placenta, colostrum and milk from sows to their offspring during late gestation and lactation. *Toxins*. 2018;10:517. <https://doi.org/10.3390/toxins10120517>
48. Karlovsky P, Suman M, Berthiller F, De Meester J, Eisenbrand G, Perrin I, et al. Impact of food processing and detoxification treatments on mycotoxin contamination. *Mycotoxin Res*. 2016;32:179-205. <https://doi.org/10.1007/s12550-016-0257-7>
49. Wang L, Wu J, Liu Z, Shi Y, Liu J, Xu X, et al. Aflatoxin B1 degradation and detoxification by *Escherichia coli* CG1061 isolated from chicken cecum. *Front Pharmacol*. 2019;9:1548. <https://doi.org/10.3389/fphar.2018.01548>
50. Kabak B. The fate of mycotoxins during thermal food processing. *J Sci Food Agric*. 2009;89:549-54. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3491>
51. Koo B, Adeshakin O, Nyachoti CM. Energy content of intact and heat-treated dry extruded-expelled soybean meal fed to growing pigs. *J Anim Sci*. 2021;99:skab131. <https://doi.org/10.1093/jas/skab131>
52. Yu Y, Shi J, Xie B, He Y, Qin Y, Wang D, et al. Detoxification of aflatoxin B1 in corn by chlorine dioxide gas. *Food Chem*. 2020;328:127121. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127121>
53. Sahindokuyucu Kocasari F. Occurrence of aflatoxin M1 in UHT milk and infant formula samples consumed in Burdur, Turkey. *Environ Monit Assess*. 2014;186:6363-8. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3860-0>
54. Sarrocco S, Vannacci G. Preharvest application of beneficial fungi as a strategy to prevent postharvest mycotoxin contamination: a review. *Crop Prot*. 2018;110:160-70. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.11.013>
55. Taheur BF, Kouidhi B, Al Qurashi YMA, Ben Salah-Abbès J, Chaieb K. Review: biotechnology of mycotoxins detoxification using microorganisms and enzymes. *Toxicon*. 2019;160:12-22. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2019.02.001>
56. Ogunade IM, Martinez-Tupia C, Queiroz OCM, Jiang Y, Drouin P, Wu F, et al. Silage review: mycotoxins in silage: occurrence, effects, prevention, and mitigation. *J Dairy Sci*. 2018;101:4034-59. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13788>
57. Yang L, Yang L, Cai Y, Luo Y, Wang H, Wang L, et al. Natural mycotoxin contamination in dog food: a review on toxicity and detoxification methods. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2023;257:114948. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114948>
58. Rodríguez M, Núñez F. Novel approaches to minimizing mycotoxin contamination. *Toxins*. 2020;12:216. <https://doi.org/10.3390/toxins12040216>
59. Tran TM, Atanasova V, Tardif C, Richard-Forget F. Stilbenoids as promising natural product-based solutions in a race against mycotoxigenic fungi: a comprehensive review. *J Agric Food Chem*. 2023;71:5075-92. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c00407>