

# 국내산 곡류와 곡류 가공품의 곰팡이독소 오염 동향

## Trends in Mycotoxin Contamination of Cereals and Cereal Products in Korea

### \*Corresponding author

Tel: +82-63-238-3401

Fax: +82-63-238-3840

E-mail: tessyl1@korea.kr

ORCID

<https://orcid.org/0000-0002-8230-650X><https://orcid.org/0000-0002-3510-3881><https://orcid.org/0000-0002-0328-7831><https://orcid.org/0000-0001-8403-9639><https://orcid.org/0000-0002-5561-4902><https://orcid.org/0000-0002-7719-2720><https://orcid.org/0000-0001-6435-3524><https://orcid.org/0000-0002-1719-6535><https://orcid.org/0000-0001-8062-8436>이데레사\*<sup>ID</sup> · 백슬기<sup>ID</sup> · 김소수<sup>ID</sup> · 백지선<sup>ID</sup> · 박진주<sup>ID</sup> · 최장남<sup>ID</sup> · 최정혜<sup>ID</sup> · 장자영<sup>ID</sup> · 김점순<sup>ID</sup>

국립농업과학원 유해생물과

Theresa Lee\*<sup>ID</sup>, Seul Gi Baek<sup>ID</sup>, Sosoo Kim<sup>ID</sup>, Ji-Seon Paek<sup>ID</sup>, Jin Ju Park<sup>ID</sup>, Jangnam Choi<sup>ID</sup>, Jung-Hye Choi<sup>ID</sup>, Ja Yeong Jang<sup>ID</sup>, and Jeomsoon Kim<sup>ID</sup>

Microbial Safety Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

In this review, the mycotoxin contamination of Korean cereals and their products is analyzed by crop based on scientific publications since 2000. Barley, rice, and corn were investigated heavier than the others. The common mycotoxins occurred in all cereals and their products were deoxynivalenol and zearalenone. Nivalenol was detected in all samples analyzed but more frequently or mainly in barley, rice, and oat. Fumonisin was commonly detected in corn and sorghum but also in adlay, millet, and rice. Adlay and millet were similar in the contamination pattern that fumonisin and zearalenone were the most frequently detected mycotoxins. Zearalenone was the most commonly detected mycotoxin with concentrations higher than the national standards (maximum limit), followed by deoxynivalenol, and aflatoxin. However, most occurrence levels were below the maximum limits for respective mycotoxins. This result shows that barley, rice, corn, sorghum, millet, and adlay are more vulnerable to mycotoxin contamination than other cereals and therefore continuous monitoring and safety management are necessary.

**Keywords:** Cereals, Contamination, Mycotoxins

Received November 14, 2022

Accepted December 12, 2022

## 서론

곰팡이독소는 농식품에 발생하는 위해요소 중 하나로 곰팡이가 작물에 감염 또는 식품에 오염된 후 분비하는 독성 이차 대사산물이다. 곰팡이독소는 오염된 농식품을 섭취한 인체에 소화기 장애, 면역저하, 간암유발 등 다양한 급·만성의 중독 증을 일으킨다. 식품에 발생하는 곰팡이독소는 주로 원료 농산물의 오염에서 비롯되나 식품의 저장·유통 중 곰팡이 오염

이 원인이 되기도 한다. 가장 잘 알려진 곰팡이독소로는 아플라톡신, 오크라톡신 A, 데옥시니발레놀, 제랄레논, 푸모니신 등이 있다. 아플라톡신을 생성하는 대표적인 곰팡이 종(species)은 *Aspergillus flavus*이며 오크라톡신 A는 *A. ochraceus* 등, 데옥시니발레놀과 제랄레논 등은 붉은곰팡이로 알려진 *Fusarium graminearum* 종 복합체, 푸모니신은 *F. verticillioides* 등이다 (Desjardins, 2006). 이들 곰팡이독소 대부분은 화학적으로 안정한 물질이기 때문에 분해나 제거가 매우 어렵다.

곰팡이독소가 발생하는 농산물은 매우 다양한데 그 중 가장 광범위하고 빈번하며 지속적인 오염이 관찰되는 농산물은 곡류이다(van der Lee 등, 2015). 주요 곡류인 쌀, 밀, 보리와 옥수수가 대표적인데 이들은 사람이 주식으로 상시 섭취하기 때문

Research in Plant Disease

eISSN 2233-9191

[www.online-rpd.org](http://www.online-rpd.org)

© The Korean Society of Plant Pathology

© 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.

에 곰팡이독소에 오염된 곡류를 섭취하면 오염수준에 따라 독성의 영향을 받을 수 있다. 따라서 주식으로 이용하는 쌀과 맥류 등의 대표적인 곡류에 대해서는 곰팡이독소 오염실태 조사가 자주 수행되었으며 곡류의 대표적인 곰팡이독소인 데옥시니발레놀과 제랄레논 등을 생성하는 붉은곰팡이에 관한 연구도 전 세계적으로 활발히 수행되고 있다(Del Ponte 등, 2022).

우리나라의 곡류 중 곰팡이독소가 발생하는 작물은 쌀, 보리, 밀, 옥수수과 수수, 귀리 등 다양한 잡곡이며 이들을 원료로 사용한 가공품과 사료에서도 많은 오염사례가 보고되고 있다. 그러나 단편적인 보고만으로는 전체 곡류의 오염실태와 연차간 변화를 파악하기가 어렵고 곡류 전반에 대한 오염 예방대책을 세우기에 부족하다. 따라서 이 논문에서는 곰팡이독소 오염에 취약한 국내산 곡류를 파악하고 해당 농산물의 안전 생산·유통관리 계획을 수립하는 데 활용할 수 있도록 2000년 이후 지금까지 국내외에 보고된 우리나라의 다양한 곡류와 가공품의 곰팡이독소 오염실태를 작물별로 분석하였다. 관련 문헌은 구글학술 검색(<https://scholar.google.co.kr>)에서 2000년 이후 '곰팡이독소', '농산물', 개별 곡류 명을 핵심단어로 검색한 결과에서 선정하였다. 문헌의 분석 결과 국내산 곡류와 곡류 가공품 별로 조사한 곰팡이독소의 종류와 오염 여부를 Table 1에 정리하였다.

## 곡류별 곰팡이독소 오염 수준

**쌀.** 백미와 현미, 찰쌀 등은 곡류 중 가장 많이 조사되었다. 2002년산 백미(88점)의 분석 결과 아플라톡신 B1, 푸모니신 B1, 오크라톡신 A, 데옥시니발레놀, 니발레놀, 제랄레논이 2.3–9.1%의 빈도로 각각 평균 최대 7.3 ng/g, 60.6 ng/g, 6.0 ng/g, 159 ng/g, 462 ng/g, 47.0 ng/g 검출되었다(Park 등, 2005a). 2003년산 백미의 오크라톡신 A 조사결과는 60점 중 8.3%가 최대 6 ng/g으로 오염되어 우리나라의 곡류 곰팡이독소 최대 기준(Table 2)을 초과하였음을 보여주었다(Park 등, 2005b). 2004–2005년 백미(21점)와 현미(21점)를 대상으로 뷰베리신을 분석한 결과는 모두 불검출이었고(Song 등, 2008), 같은 기간 생산된 쌀(134점)에서도 아플라톡신이 불검출되었다(Ok 등, 2007b). 2005–2006년산 백미(14점)와 현미(7점)의 경우 데옥시니발레놀이 각각 43%, 29%의 빈도로 최대 48.2 µg/kg, 9.3 µg/kg 검출된 반면 제랄레논은 현미에서 100%의 빈도로 최대 60.7 µg/kg 검출되었다(Ok 등, 2007a). 2005–2008년에 수집한 찰쌀(43점), 현미찰쌀(25점), 백미(76점), 현미(51점)에서는 데옥시니발레놀이 현미찰쌀(44%), 현미(16%), 백미(14%), 찰쌀(5%)의 순으로 현미찰쌀에 가장 많이 발생하였으나 오염수준은 현

미(0.035 mg/kg), 찰쌀(0.031 mg/kg), 백미(0.020 mg/kg), 현미찰쌀(0.017 mg/kg)의 순으로 높았다(Ok 등, 2009b). 2007–2008년 수집 찰쌀, 백미와 현미의 데옥시니발레놀 오염빈도는 각각 5%, 8%, 14%, 오염수준은 각각 최대 30.8 µg/kg, 9.7 µg/kg, 43.8 µg/kg으로 찰쌀은 이전 시료에 비해 유사했으나 백미는 감소하였고 현미는 약간 증가하였다(Ok 등, 2009a). 쌀 유래 시리얼은 50점 중 38%에서 데옥시니발레놀이 최대 57.5 µg/kg 검출되었는데 이는 원료보다 높은 수준이었다. 2007년산 미국 처리장 가공 벼에서는 데옥시니발레놀, 니발레놀, 제랄레논의 자연발생을 분석하였다. 이 중 가장 높은 오염수준을 보인 것은 니발레놀로 색채미에서 4,180 ng/g, 청치미(3,607 ng/g), 현미(569 ng/g) 순으로 검출되었으며 색채미와 청치미가 각각 94%, 100%의 오염률을 보인데 반해 현미와 백미는 각각 20%, 2%에 불과하였다(Lee 등, 2011). 그러나 제랄레논의 오염수준은 색채미, 청치미, 현미에서 평균 327 ng/g, 765 ng/g, 96 ng/g으로 높게 나타났으며 데옥시니발레놀은 색채미에서 최대 1,355 ng/g 검출되었다. 2009년 이전 생산된 쌀(60점)과 현미(24점)에서는 아플라톡신이 검출되지 않았다(Kim 등, 2010).

2009년산 벼(32점)에서는 제랄레논이 13점에서 최대 172.9 µg/kg, 데옥시니발레놀, 니발레놀과 푸모니신이 각 1점에서 (122 µg/kg, 133 µg/kg, 푸모니신 총합 3,403.4 µg/kg) 검출되었음이 보고되었다(Lee 등, 2010). 2009년 유통 곡류와 가공품을 대상으로 B형 트리코쎬신(데옥시니발레놀과 3-아세틸, 15-아세틸 데옥시니발레놀, 니발레놀과 4-아세틸 니발레놀) 독소를 분석하였다. 백미(35점), 찰쌀(64점), 현미(60점)는 모두 니발레놀의 오염이 가장 높았지만 최대 오염수준은 각각 45.0 µg/kg, 23.1 µg/kg, 45.4 µg/kg이었고 데옥시니발레놀은 각각 31.7 µg/kg, 18.2 µg/kg, 28.9 µg/kg으로 낮은 수준이었다(Ok 등, 2011b). 이들 시료의 15-아세틸 데옥시니발레놀 오염수준은 백미(24.1 µg/kg)가 가장 높았고 3-아세틸 데옥시니발레놀은 백미와 현미에서만 10 µg/kg이 각각 검출되었으며 4-아세틸 니발레놀의 오염수준은 현미(18.7 µg/kg), 백미(15 µg/kg), 찰쌀(8.9 µg/kg) 순으로 나타났다. 이 연구진은 동일한 시료를 관행 재배와 유기농 재배로 구분하여 분석하였는데 유기농 백미와 현미의 니발레놀 오염수준이 관행 시료보다 유의하게 높았다고 보고하였다(Ok 등, 2011a). 2010년산 백미와 현미 각 80점에서는 백미가 니발레놀과 제랄레논에만 각각 1.3% (최대 12.6 µg/kg), 8.8% (최대 11.5 µg/kg) 오염된 반면 현미에서 아플라톡신, 데옥시니발레놀, 니발레놀, 제랄레논이 각각 7.5% (최대 2.7 µg/kg), 1.3% (43.2 µg/kg), 28.8% (34.9 µg/kg), 83.8% (201.3 µg/kg) 검출되어 현미의 제랄레논 오염이 최대기준을 초과하였다(Ok 등, 2014b). 2011년산 곡류와 가공품의 오염에 대한 보고는

**Table 1.** Mycotoxin occurrence in Korean cereals and cereal products reported in scientific publications between 2000 and 2022.

Cereals	Sampling year	No. of samples	Mycotoxin							Contaminated food product	Analytical method	Reference
			AFB1	OTA	FB1	DON	NIV	ZEN	Others			
Adlay	2011	2	○	○	-	-	-	-	-	-	HPLC	Park et al. (2013)
	2012	13	●	-	-	●	-	-	-	-	HPLC	Kim et al. (2013b)
	2016–2017	12	-	○	●	-	-	●	-	-	LC-MS/MS	Kim et al. (2017b)
	2017–2018	5	○	○	●	-	-	●	-	-	LC-MS/MS	Yang et al. (2019)
	2017–2018	70	-	-	●	●	●	●	-	-	HPLC/LC-MS	Lee et al. (2020)
	2017–2018	6	○	○	●	-	-	●	-	-	LC-MS/MS	Yang et al. (2019)
Barley	1998–1999	30	○	○	○	-	-	-	-	-	ELISA/HPLC	Park et al. (2002a)
	1998–1999	30	-	-	-	-	-	●	-	-	ELISA/HPLC	Park et al. (2002b)
	2002	52	-	-	-	●	-	-	-	-	ELISA/HPLC	Pei et al. (2004)
	2003	22	-	●	-	-	-	-	-	-	LC-MS/MS	Park et al. (2005b)
	2002, 2005		○	-	-	-	-	-	-	-	HPLC	Oh et al. (2007)
	2004–2005	134	○	-	-	-	-	-	-	-	ELISA/HPLC	Ok et al. (2007b)
	2004–2005	12	-	-	-	-	-	-	● (BEA)	-	HPLC	Song et al. (2008)
	2005–2006	14	-	-	-	●	-	●	-	-	LC-MS	Ok et al. (2007a)
	2005–2008	84	-	-	-	●	-	-	-	-	HPLC	Ok et al. (2009b)
	2007–2008	70	-	-	-	●	-	-	-	-	HPLC/LC-MS	Ok et al. (2009a)
	<2009	24	○	-	-	-	-	-	-	-	ELISA/LC-MS/MS	Kim et al. (2010)
	2009	39	-	-	-	●	●	●	● (3-,15-ADON, 4-ANIV)	-	GC	Ok et al. (2011b)
	2010	85	-	-	-	●	●	●	-	-	HPLC	Ryu et al. (2011)
2011	43	○	○	●	●	-	●	○ (T-2/HT-2 toxin)	-	LC-MS/MS	Kim et al. (2013a)	
2011	6	○	○	-	-	-	-	-	-	HPLC	Park et al. (2013)	
2012	16	○	-	-	●	-	-	-	-	HPLC	Kim et al. (2013b)	
2013	25	-	-	-	-	-	-	○ (T-2/HT-2 toxin)	-	LC-MS/MS	Paek and Kang (2015)	

Table 1. Continued

Cereals	Sampling year	No. of samples	Mycotoxin							Contaminated food product	Analytical method	Reference
			AFB1	OTA	FB1	DON	NIV	ZEN	Others			
	2017–2018	13	○	○	○	-	-	-	-	-	LC-MS/MS	Yang et al. (2019)
Barley product	1998–1999	32	●	●	○	-	-	-	-	Powder, roasted, bisquet, meal, flour, tea	ELISA/HPLC	Park et al. (2002a)
	1998–1999	32	-	-	-	-	-	●	-		ELISA/HPLC	Park et al. (2002b)
	2002	13	-	-	-	●	-	-	-	Malt, pearled barley	ELISA/HPLC	Pei et al. (2004)
	2003	46	-	●	-	-	-	-	-	Beer	LC-MS/MS	Park et al. (2005b)
	2004–2005	7	○	-	-	-	-	-	-	-	ELISA/HPLC	Ok et al. (2007b)
	2005–2008	59	-	-	-	●	-	-	-	Beer	HPLC	Ok et al. (2009b)
	2007–2008	26	-	-	-	●	-	-	-	Beer	HPLC/LC-MS	Ok et al. (2009a)
	<2009	24	○	-	-	-	-	-	-	-	ELISA/LC-MS/MS	Kim et al. (2010)
	2011	20	-	-	-	-	-	-	○	-	LC-MS/MS	Choi et al. (2012)
	2012	8	●	-	-	●	-	-	-	Powdered malt	HPLC	Kim et al. (2013b)
Buckwheat	2005–2008	34	-	-	-	○	-	-	-	-	HPLC	Ok et al. (2009b)
	2012	7	○	-	-	●	-	-	-	-	HPLC	Kim et al. (2013b)
	2017–2018	3	○	○	○	-	-	-	○	-	LC-MS/MS	Yang et al. (2019)
Buckwheat product	2017–2018	3	○	○	○	-	-	-	○	Buckwheat product	LC-MS/MS	Yang et al. (2019)
Corn	1998–1999	18	○	○	○	-	-	-	-	-	ELISA/HPLC	Park et al. (2002a)
	1998–1999	18	-	-	-	-	-	●	-	-	ELISA/HPLC	Park et al. (2002b)
	2002, 2005		○	-	-	-	-	-	-	-	HPLC	Oh et al. (2007)
	2004–2005	50	●	-	-	-	-	-	-	-	ELISA/HPLC	Ok et al. (2007b)
	2004–2005	3	-	-	-	-	-	-	● (BEA)	-	HPLC	Song et al. (2008)
	2005–2006	14	-	-	-	●	-	●	-	-	LC-MS	Ok et al. (2007a)
	2005–2008	96	-	-	-	●	-	-	-	-	HPLC	Ok et al. (2009b)
	2007–2008	82	-	-	-	●	-	-	-	-	HPLC/LC-MS	Ok et al. (2009a)
	<2009	30	○	-	-	-	-	-	-	-	ELISA/LC-MS/MS	Kim et al. (2010)
	2009	19	-	-	●	●	●	●	-	-	LC-MS	Lee et al. (2010)
	2009	25	-	-	-	●	●	●	-	-	GC	Ok et al. (2011b)
	2011	84	○	○	●	○	-	-	○	○ (T-2/HT-2 toxin)	LC-MS/MS	Kim et al. (2013a)

Table 1. Continued

Cereals	Sampling year	No. of samples	Mycotoxin							Contaminated food product	Analytical method	Reference
			AFB1	OTA	FB1	DON	NIV	ZEN	Others			
Corn product	2012	10	●	-	-	●	-	-	-	-	HPLC	Kim et al. (2013b)
	2013	3	-	-	-	-	-	●	(T-2/HT-2 toxin)	-	LC-MS/MS	Paek and Kang (2015)
	<2016	~100	●	○	●	●	●	●	(T-2/HT-2 toxin, 3-ADON)	-	LC-MS/MS	Kim et al. (2017a)
	2017–2018	1	○	○	●	-	-	○	-	-	LC-MS/MS	Yang et al. (2019)
	1996	76	-	-	●	-	-	-	-	Flakes, snack, starch, popcorn, others	ELISA/HPLC	Kim et al. (2002)
	1998–1999	47	●	○	●	-	-	-	-	Roasted, meal, flour, snack, others	ELISA/HPLC	Park et al. (2002a)
	1998–1999	47	-	-	-	-	-	●	-	-	ELISA/HPLC	Park et al. (2002b)
	2002, 2005	99	○	-	-	-	-	-	-	-	HPLC	Oh et al. (2007)
	2004–2005	99	○	-	-	-	-	-	-	-	ELISA/HPLC	Ok et al. (2007b)
	2005–2006	7	-	-	-	●	-	○	-	Canning corn	LC-MS	Ok et al. (2007a)
	2005–2008	40	-	-	-	●	-	-	-	Canned corn, popcorn	HPLC	Ok et al. (2009b)
	2007–2008	43	-	-	-	●	-	-	-	Breakfast cereals	HPLC/LC-MS	Ok et al. (2009a)
	2011	9	-	-	-	-	-	●	-	Corn-based food	LC-MS/MS	Choi et al. (2012)
2011	6	○	○	-	-	-	-	-	-	HPLC	Park et al. (2013)	
<2012	32	-	-	-	-	-	●	-	Snack	HPLC	Ok et al. (2014a)	
2012	18	○	-	-	●	-	-	-	Popcorn	HPLC	Kim et al. (2013b)	
2017–2018	5	○	○	●	-	-	●	-	Roasted, popcorn	LC-MS/MS	Yang et al. (2019)	
Millet	2002, 2005	●	-	-	-	-	-	-	-	Millet	HPLC	Oh et al. (2007)
	2004–2005	4	-	-	-	-	-	○	(BEA)	-	HPLC	Song et al. (2008)
	2011	7	○	○	-	-	-	-	-	-	HPLC	Park et al. (2013)
	2012	16	●	-	-	●	-	-	-	Millet	HPLC	Kim et al. (2013b)
	2013	19	-	-	-	-	-	●	(T-2/HT-2 toxin)	Common millet, foxtail millet	LC-MS/MS	Paek and Kang (2015)
	<2016	●	○	●	●	●	●	○	(T-2/HT-2 toxin, 3-ADON)	Millet	LC-MS/MS	Kim et al. (2017a)
	2016–2017	10	●	●	●	-	-	●	-	Proso millet, foxtail millet	LC-MS/MS	Kim et al. (2017b)
2017–2018	16	○	○	●	-	-	●	-	Proso millet, foxtail millet	LC-MS/MS	Yang et al. (2019)	

Table 1. Continued

Cereals	Sampling year	No. of samples	Mycotoxin							Contaminated food product	Analytical method	Reference
			AFB1	OTA	FB1	DON	NIV	ZEN	Others			
Oat	2017–2018	26	-	-	●	●	●	●	-	Proso millet	HPLC/LC-MS	Lee et al. (2020)
	2019	24	-	-	●	●	●	●	-	Proso millet	UPLC	Choi et al. (2021)
Rice	2017–2018	7	○	○	○	-	-	-	○	-	LC-MS/MS	Yang et al. (2019)
	2017–2018	88	-	-	●	●	●	●	-	-	HPLC/LC-MS	Lee et al. (2020)
	2002	88	●	●	●	●	●	●	-	Polished	HPLC/MS	Park et al. (2005a)
	2003	60	-	●	-	-	-	-	-	Polished	LC-MS/MS	Park et al. (2005b)
	2002, 2005		○	-	-	-	-	-	-	-	HPLC	Oh et al. (2007)
	2004–2005	134	○	-	-	-	-	-	-	Polished	ELISA/HPLC	Ok et al. (2007b)
	2004–2005	42	-	-	-	-	-	-	○ (BEA)	-	HPLC	Song et al. (2008)
	2005–2006	21	-	-	-	●	-	-	-	Polished, brown	LC-MS	Ok et al. (2007a)
	2005–2008	195	-	-	-	●	-	-	-	Polished, brown, glutinous	HPLC	Ok et al. (2009b)
	2007	201	-	-	-	●	●	●	-	Polished brown, colored, blue-tinged	GC-MS	Lee et al. (2011)
	2007–2008	149	-	-	-	●	-	-	-	Polished, brown, glutinous	HPLC/LC-MS	Ok et al. (2009a)
	<2009	84	○	-	-	-	-	-	-	-	ELISA/LC-MS/MS	Kim et al. (2010)
	2009	124	-	-	-	●	●	●	● (3-,15-ADON, 4-ANIV)	Polished, brown, glutinous	GC	Ok et al. (2011b)
	2009	32	-	-	●	●	●	●	-	Paddy		Lee et al. (2010)
	2010	160	●	-	-	●	●	●	-	White, brown	HPLC	Ok et al. (2014b)
	2011	47	○	○	●	●	-	○ (T-2/HT-2 toxin)	-	Polished	LC-MS/MS	Kim et al. (2013a)
2011	371	-	-	-	●	●	●	-	Paddy, husk, brown, blue-tinged, bran, broken, discolored, polished	HPLC	Lee et al. (2013)	
2011	22	○	○	-	-	-	-	-	-	HPLC	Park et al. (2013)	
2012	45	○	-	-	●	-	-	-	Glutinous	HPLC	Kim et al. (2013b)	
2010–2012	152	-	-	-	●	●	● (DAS)	-	Paddy, husk, brown, blue-tinged, broken, discolored, polished	LC-MS	Lee et al. (2014)	
2013	28	-	-	-	-	-	● (T-2/HT-2 toxin)	-	Glutinous, brown	LC-MS/MS	Paek and Kang (2015)	
<2016		●	○	●	●	●	○ (T-2/HT-2 toxin, 3-ADON)	-	Brown	LC-MS/MS	Kim et al. (2017a)	

Table 1. Continued

Cereals	Sampling year	No. of samples	Mycotoxin							Contaminated food product	Analytical method	Reference
			AFB1	OTA	FB1	DON	NIV	ZEN	Others			
Rice product	2017–2018	18	○	○	●	-	-	-	●	Brown	LC-MS/MS	Yang et al. (2019)
	2003	14	○	○	-	-	-	-	-	-	LC-MS/MS	Park et al. (2005b)
	2002, 2005		○	-	-	-	-	-	-	-	HPLC	Oh et al. (2007)
	2007–2008	50	-	-	-	●	-	-	-	Cereals	HPLC/LC-MS	Ok et al. (2009a)
	2017–2018	13	○	○	●	-	-	-	-	Brown	LC-MS/MS	Yang et al. (2019)
	2005–2008	5	-	-	-	●	-	-	-	-	HPLC	Ok et al. (2009b)
Rye product	2011	1	○	○	-	-	-	-	-	-	HPLC	Park et al. (2013)
Sorghum	2011	3	●	○	-	-	-	-	-	-	HPLC	Park et al. (2013)
	2012	11	●	-	-	●	-	-	-	-	HPLC	Kim et al. (2013b)
	2013	15	-	-	-	-	-	-	●	(T-2/HT-2 toxin)	LC-MS/MS	Paek and Kang (2015)
	<2016		●	○	●	●	●	●	○	(T-2/HT-2 toxin, 3-ADON)	LC-MS/MS	Kim et al. (2017a)
	2016–2017	8	-	○	●	-	-	-	●	-	LC-MS/MS	Kim et al. (2017b)
2017–2018	8	○	○	●	-	-	-	●	-	LC-MS/MS	Yang et al. (2019)	
2017–2018	60	-	-	●	●	●	●	●	-	HPLC/LC-MS	Lee et al. (2020)	
Wheat	2004–2005	4	-	-	-	-	-	-	●	(BEA)	HPLC	Song et al. (2008)
	2005–2008	41	-	-	-	●	-	-	-	-	HPLC	Ok et al. (2009b)
	2007–2008	41	-	-	-	●	-	-	-	-	HPLC/LC-MS	Ok et al. (2009a)
	2009	54	-	-	-	●	●	-	●	(3-,15-ADON, 4-ANIV)	GC	Ok et al. (2011b)
	2010	41	-	-	-	●	●	●	-	-	HPLC	Ryu et al. (2011)
	2011	1	○	○	-	-	-	-	-	-	HPLC	Park et al. (2013)
2012	8	●	-	-	●	-	-	-	-	HPLC	Kim et al. (2013b)	
2003	35	-	○	-	-	-	-	-	-	-	LC-MS/MS	Park et al. (2005b)
Wheat product	2002, 2005		○	-	-	-	-	-	-	-	HPLC	Oh et al. (2007)
	2004–2005	7	○	-	-	-	-	-	-	-	ELISA/HPLC	Ok et al. (2007b)
	2005–2006	7	-	-	-	●	-	-	○	Flour	LC-MS	Ok et al. (2007a)

Table 1. Continued

Cereals	Sampling year	No. of samples	Mycotoxin							Contaminated food product	Analytical method	Reference
			AFB1	OTA	FB1	DON	NIV	ZEN	Others			
	2005–2008	44	-	-	-	●	-	-	-	Flour	HPLC	Ok et al. (2009b)
	2007–2008	53	-	-	-	●	-	-	-	Biscuits, bread, flour	HPLC/LC-MS	Ok et al. (2009a)
	2008	9	-	-	-	-	-	○	-	-	HPLC/LC-MS	Jang et al. (2011)
	<2009	24	○	-	-	-	-	-	-	-	ELISA/LC-MS/MS	Kim et al. (2010)
	2009	38	-	-	-	●	●	-	●	Flour	GC	Ok et al. (2011b)
	2011	7	○	○	-	-	-	-	-	-	HPLC	Park et al. (2013)
	<2012	30	-	-	-	-	-	●	-	Dnack	HPLC	Ok et al. (2014a)
	2012	14	○	-	-	●	-	-	-	Flour	HPLC	Kim et al. (2013b)
	2013	15	-	-	-	-	-	-	○	-	LC-MS/MS	Paek and Kang (2015)
Others	2002, 2005		○	-	-	-	-	-	-	-	HPLC	Oh et al. (2007)
	2005–2006	7	-	-	-	○	-	-	-	-	LC-MS	Ok et al. (2007a)
	2005–2008	91	-	-	-	●	-	-	-	Biscuits, bread, cereals	HPLC	Ok et al. (2009b)
	2008	432	-	-	-	-	-	●	-	Infusion tea, starch, sunshik	HPLC	Jang et al. (2011)
	2009	58	-	-	-	●	-	●	●	Mixed grains, breakfast cereals	GC	Ok et al. (2011b)
	2011	60	-	-	-	-	-	●	-	Misutgaru, snack, others	LC-MS/MS	Choi et al. (2012)
	<2012	101	-	-	-	-	-	●	-	Dry noodle, instant noodle, infant formula	HPLC/UPLC	Ok et al. (2014a)
	2012	30	●	-	-	●	-	-	-	Roasted grain powder, bake flour, frying flour	HPLC	Kim et al. (2013b)
	<2013	47	-	●	●	●	-	●	-	Sunsik	LC-MS/MS	Jung et al. (2015)
	<2016		●	●	●	●	●	●	●	Mixed grains	LC-MS/MS	Kim et al. (2017a)
	<2018	97	-	-	-	-	-	-	●	Unknown cereals and product	LC-MS/MS	Kim et al. (2019)
	2017–2018	24	○	○	○	○	○	○	-	-	LC-MS/MS	Yang et al. (2019)

AFB1, aflatoxins B1; OTA, ochratoxin A; FB1, fumonisin B1; DON, deoxynivalenol; NIV, nivalenol; ZEN, zearalenone; 3-ADON, 3-acetyl DON; 15-ADON, 15-acetyl DON; 4-ANIV, 4-acetyl NIV; DAS, diacetoxyscirpenol; BEA, beavericin; ENN, enniatin; ALT, alternariol; AME, alternariol monomethyl ether; TEN, tentoxin; HPLC, high performance liquid chromatography; LC-MS/MS, liquid chromatography tandem mass spectrometry; ELISA, enzyme-linked immunosorbent assay; GC, gas chromatography; UPLC, ultra performance liquid chromatography. Open and closed circles indicate mycotoxin not detected (○) or detected (●), respectively.



**Table 2.** Korean standards for mycotoxin limits in foods

Mycotoxin	Target food	Maximum limits
Total aflatoxin (sum of B <sub>1</sub> , B <sub>2</sub> , G <sub>1</sub> , G <sub>2</sub> )	Plant nature material (except algae)	≤15 µg/kg (≤10 µg/kg for B <sub>1</sub> )
	Processed foods	≤15 µg/kg (≤10 µg/kg for B <sub>1</sub> )
	Infant formula, weaning food, baby food	≤0.10 µg/kg for B <sub>1</sub> )
Ochratoxin A	Cereals	≤5 µg/kg
	Simply processed cereals (ground, cut, etc.)	
Fumonisin (sum of B <sub>1</sub> and B <sub>2</sub> )	Corn (except corn intended for starch or starch sugar manufacture)	≤4 mg/kg
	Sorghum	
	Simply processed sorghum (ground, cut, etc.)	
	Simply processed corn (ground, cut, etc.)	≤2 mg/kg
	Processed cereal products containing ≥ 50% of simply processed corn or sorghum)	≤1 mg/kg
Deoxynivalenol	Breakfast cereals	
	Processed corn for popcorn	
	Cereals (except corn)	≤1 mg/kg
	Simply processed cereals (ground, cut, etc., except corn)	
	Corn	≤2 mg/kg
	Simply processed corn (ground, cut, etc.)	
	Breakfast cereals	≤0.5 mg/kg
Zearalenone	Infant formula, weaning food, baby food	≤0.2 mg/kg
	Noodles	≤0.75 mg/kg
	Cereals	≤100 µg/kg
	Simply processed cereals (ground, cut, etc.)	
	Snacks	≤50 µg/kg
	Infant formula, weaning food, baby food	≤20 µg/kg
	Breakfast cereals	≤50 µg/kg

The mycotoxins related to cereals were selected from Ministry of Food and Drug Safety Notification (No. 2022-76, 2022.10.25.).

모두 4건이 있었다. 백미(47점)의 분석결과 제랄레논, 푸모니신 B1, 데옥시니발레놀만 각각 36.2%, 29.8%, 6.4%의 빈도로 검출되었고 최대 오염수준은 각각 6.7 µg/kg, 6.7 µg/kg, 93.1 µg/kg 이었다(Kim 등, 2013a). 다른 연구에서도 백미(9점)와 찰쌀(4점)에서 아플라톡신은 검출되지 않았다(Park 등, 2013). 2011년 미곡처리장의 벼 가공품과 부산물을 대상으로 조사한 결과 색채미(45점)의 니발레놀과 데옥시니발레놀 오염수준이 각각 56%, 최대 4.4 mg/kg과 38%, 2.2 mg/kg으로 가장 높았다(Lee 등, 2013). 반면 현미의 오염수준은 니발레놀 0.139 mg/kg, 제랄레논 0.072 mg/kg, 데옥시니발레놀 0.057 mg/kg, 백미는 니발레놀과 데옥시니발레놀이 각각 0.046 mg/kg과 0.047 mg/kg이었다.

2012년 미곡처리장 벼 가공품 중에서도 색채미의 곰팡이독소의 오염이 가장 높았으며(데옥시니발레놀, 니발레놀, 제랄레논 총합 6.6 mg/kg) 색채미를 제외한 가공품에서는 2-7%의 시료에서 diacetoxyscirpenol이 검출되었다(Lee 등, 2014). 2012년 산 찰쌀(8점), 백미(14점), 현미(11점), 찌쌀(12점)의 경우 아플라톡신은 검출되지 않았으나 찰쌀에서는 25%의 빈도로 최대 110 µg/kg의 데옥시니발레놀이 검출되었다(Kim 등, 2013b). 2013년 찰쌀(4점), 현미(13점), 백미(11점)의 T-2/HT-2 독소 분석 결과는 찰쌀과 현미에 T-2/HT-2 독소가 각각 1.3/0.0 µg/kg, 4.0/4.2 µg/kg 발생하였음을 보여주었다(Paek과 Kang, 2015). 2016년 이전 생산으로 추정되는 현미에서는 아플라톡신 B1이 1%의 시료

에서 1.1 ng/g, 푸모니신 B1과 B2가 각각 42% (최대 22.8 ng/g), 44% (최대 18.8 ng/g), 데옥시니발레놀이 7% (최대 12.3 ng/g), 니발레놀은 5% (36.8 ng/g), 제랄레놀은 32% (최대 37.6 ng/g)에서 발생하였다(Kim 등, 2017a). 2017-2018년 쌀(백미, 현미, 유색미, 찹쌀) 18점의 분석결과는 현미만 6점 중 2점이 푸모니신(B1+B2, 최대 11.2 µg/kg), 1점이 제랄레놀(15.4 µg/kg)에 오염되었음을 나타냈다(Yang 등, 2019). 현미 가공품(8점)에서는 1점에서 푸모니신(B1+B2)이 33.6 µg/kg 검출되었다.

이상의 결과는 쌀에 데옥시니발레놀, 니발레놀, 제랄레놀이 상시 발생하고 환경에 따라 아플라톡신, 오크라톡신 A와 푸모니신도 발생할 수 있음을 보여주었다. 오염수준은 대부분 우리나라의 곡류 곰팡이독소 최대기준을 초과하지 않았으나 오크라톡신 A, 데옥시니발레놀, 제랄레놀의 허용기준 초과 사례가 총 6회 보고되었다. 니발레놀의 경우 최대기준은 없지만 데옥시니발레놀 보다 독성이 높다고 보고되었고(Eriksen 등, 2004; Minervini 등, 2004) 쌀의 오염수준이 데옥시니발레놀 최대기준보다 높은 경우가 발생하고 있어 지속적인 모니터링을 통한 감시가 필요한 것으로 보인다. 한편, 벼 가공부산물, 특히 색채미 등은 곰팡이독소 오염수준이 높으므로 이들을 식품이나 사료로 활용할 때 사전 곰팡이독소 검사로 안전성을 확인할 필요가 있다.

**보리.** 보리와 보리 가공품의 오염실태 조사도 꾸준히 수행되었다. 1998-1999년에 수집한 보리(30점)와 가공품(32점)의 조사 결과는 보리 가공품(보리가루, 볶은 보리, 보리 비스킷)의 12.5%가 아플라톡신 B1 (8-11 ng/g)과 오크라톡신 A (7-8 ng/g)에 오염되었고 각각의 최대치는 아플라톡신과 오크라톡신 A의 최대기준을 초과하였다(Park 등, 2002a). 동일한 시료에서 제랄레놀은 보리의 33%에서 14-171 ng/g 검출되었고, 보리 가공품은 38%에서 최대 120 ng/g 검출되어 이들 또한 현재의 기준으로 초과되었음을 보여주었다(Park 등, 2002b). 2002년산 보리의 데옥시니발레놀 평균 오염수준은 6줄 걸보리(20점)에서 최대 2.28 µg/g, 2줄 맥주보리(12점) 최대 1.78 µg/g, 6줄 쌀보리(20점) 최대 2.35 µg/g로 모두 최대기준을 초과하였으나 보리 가공품(13점)은 맥아에서 최대 0.39 µg/g이 검출되었다(Pei 등, 2004). 2003년산 보리(22점)에서는 22.7%에서 0.9 ng/g의 오크라톡신 A가, 맥주(46점)은 2%에서 0.3 ng/g이 검출되었다(Park 등, 2005b). 2004-2005년산 보리(12점)에서는 뷰베리신이 최대 0.03 µg/g 검출되었고(Song 등, 2008) 같은 기간에 수집한 보리(134점)와 가공품(7점, 맥주)에서는 아플라톡신이 불검출되었다(Ok 등, 2007b). 2005-2006년산 보리의 경우 데옥시니발레놀이 39% 빈도로 최대 99.73 µg/kg, 제랄레놀은 7%에서 최대

33.3 µg/kg이 각각 검출되었다(Ok 등, 2007a). 2005-2008년에 수집된 보리(84점)와 보리 가공품(26점, 맥주) 중 보리의 58%와 맥주의 12%에서 데옥시니발레놀이 각각 평균 0.022 mg/kg 검출되었다(Ok 등, 2009b). 2007-2008년 수집한 보리(70점)와 가공품(26점, 맥주)에서도 데옥시니발레놀이 보리의 54%에서 최대 17.4 µg/kg, 맥주의 12%에서 20.9 µg/kg 검출되었다(Ok 등, 2009a).

2009년 유통 보리(39점)에서는 쌀과 마찬가지로 B형 트리코세신 5종이 모두 검출되었는데 니발레놀의 오염빈도와 수준이 59%와 최대 100.9 µg/kg으로 가장 높았으며 다음은 데옥시니발레놀(56%, 40.1 µg/kg), 15-아세틸 데옥시니발레놀(31%, 7.1 µg/kg), 3-아세틸 데옥시니발레놀(26%, 3.9 µg/kg), 4-아세틸 니발레놀(15%, 9.9 µg/kg) 순으로 나타났다(Ok 등, 2011a). 보리의 데옥시니발레놀 오염수준은 동일한 해의 쌀보다 높았다. 2010년산 보리의 경우 걸보리(16점), 쌀보리(46점), 청보리(12점), 맥주보리(11점)에서 최대 7.02 µg/g, 9.74 µg/g, 5.39 µg/g의 니발레놀이 각각 검출되었고 데옥시니발레놀은 걸보리와 쌀보리, 맥주보리에서 최대 8.13 µg/g, 4.2 µg/g, 2.41 µg/g이 각각 검출되었다(Ryu 등, 2011). 이러한 오염수준은 지금까지 실태조사 결과 중 가장 높은 결과로 최대기준을 2배 이상 초과하는 수준이었다. 제랄레놀은 쌀보리에서 최대 3.52 (평균 0.65 µg/g), 걸보리와 청보리에서는 최대 0.07 µg/g이 검출되어 쌀보리의 최대 오염수준이 제랄레놀 최대기준을 초과하였다. 2011년 보리(43점)에서는 푸모니신이 1점에서 6.06 µg/kg, 데옥시니발레놀과 제랄레놀이 각각 55.8% (최대 334 µg/kg), 34.9% (최대 8.95 µg/kg) 검출되었다(Kim 등, 2013a). 2012년 보리(16점)에서는 44%에서 데옥시니발레놀만 최대 202.9 µg/kg 검출되었는데 가공품(8점, 맥아분말)에서는 아플라톡신 G2 (0.02 µg/kg)과 데옥시니발레놀(27.5 µg/kg)이 각각 1점에서 검출되었다(Kim 등, 2013b).

이상의 결과 보리에서는 데옥시니발레놀이 가장 많이 발생하였으며 다음으로 제랄레놀과 니발레놀이 발생하였다. 그러나 오염수준은 생산 연도에 따라 차이가 있었다. 걸보리, 쌀보리, 맥주보리는 2002년산과 2010년산에서 데옥시니발레놀과 제랄레놀 최대기준을 초과하는 사례가 보고되었는데 이는 그 해의 붉은곰팡이병 발생과 관련이 있으므로 지속적인 붉은곰팡이병 모니터링과 수확물의 오염실태조사가 필요한 것으로 보인다. 보리의 가공품에도 데옥시니발레놀이 주로 발생하는 가운데 가공품과 생산 연도에 따라 아플라톡신, 오크라톡신 A, 제랄레놀 최대기준을 초과하는 사례가 있었다.

**밀.** 밀과 밀 가공품의 곰팡이독소 오염조사는 보리보

다 적게 수행되었고 최근 10년간 실태조사 보고가 없었다. 2004-2005년산 밀(4점)에서 뷰베리신 오염도를 조사한 결과 1점에서만 0.14  $\mu\text{g/g}$ 이 검출되었는데 이는 보리보다 약간 높은 수준이었다(Song 등, 2008). 2005-2006년 유통 밀가루(7점)에서는 데옥시니발레논만 최대 17.8  $\mu\text{g/kg}$ 이 검출되었다(Ok 등, 2007a). 2005-2008년에 수집된 밀(41점)과 가공품(44점, 밀가루)의 데옥시니발레논 오염률은 각각 59%, 41%이었으며 평균 오염수준은 0.056 mg/kg, 0.040 mg/kg이었다(Ok 등, 2009b). 2007-2008년에 수집한 밀과 가공품의 데옥시니발레논 오염수준은 밀(41점)의 59%에서 최대 353.6  $\mu\text{g/kg}$ 이었으며 밀 가공품(비스킷, 빵, 밀가루)에서는 38-43%의 빈도로 밀보다 낮은 3.1-172.9  $\mu\text{g/kg}$ 이 검출되었다(Ok 등, 2009a).

2009년산 밀과 밀 가공품(밀가루)을 대상으로 B형 트리코세신 독소를 분석한 결과, 밀과 밀가루 모두 데옥시니발레논의 오염이 가장 높았고 오염빈도는 85-79%였으며 최대 오염수준이 각각 241.8  $\mu\text{g/kg}$ 과 199.5  $\mu\text{g/kg}$ 으로 동일 시료의 니발레논(밀 65%, 최대 58.5  $\mu\text{g/kg}$ ; 밀가루 21%, 31.8  $\mu\text{g/kg}$ )보다 오염도가 높았다(Ok 등, 2011b). 이들 시료의 15-아세틸 데옥시니발레논, 3-아세틸 데옥시니발레논과 4-아세틸 니발레논의 오염수준은 각각 0, 5.1  $\mu\text{g/kg}$ , 8.6  $\mu\text{g/kg}$  (밀)과 21.0  $\mu\text{g/kg}$ , 4.9  $\mu\text{g/kg}$ , 9.5  $\mu\text{g/kg}$  (밀가루)이었다. 2010년산 밀(41점)의 경우 니발레논, 데옥시니발레논, 제랄레논이 92.7%, 73.2%, 17.1%의 빈도로 검출되었으며 최대 오염수준은 각각 5.65  $\mu\text{g/g}$ , 1.03  $\mu\text{g/g}$ , 0.16  $\mu\text{g/g}$ 으로 모두 최대기준을 초과하였다(Ryu 등, 2011). 2012년 이전으로 추정되는 밀 가공품(20점, 스낵)에서는 6.7%의 시료에서 최대 8.3  $\mu\text{g/kg}$ 의 제랄레논이 검출되었다(Ok 등, 2014a). 2012년산 밀(8점)은 75%가 데옥시니발레논(최대 94.9  $\mu\text{g/kg}$ )에, 1점이 아플라톡신 B1 (0.02  $\mu\text{g/kg}$ )에, 밀가루(14점)는 21%가 데옥시니발레논(최대 181.8  $\mu\text{g/kg}$ )에 오염되어 밀보다 가공품의 데옥시니발레논 오염수준이 높았다(Kim 등, 2013b).

이상의 결과는 국내산 밀이 보리에 비해 데옥시니발레논, 니발레논, 제랄레논의 오염수준이 대체로 낮았음을 보여준다. 보리와 마찬가지로 밀에도 데옥시니발레논의 오염이 주로 발생했으나 오염수준은 2010년산을 제외하고 모두 최대기준보다 낮았다.

**기장/조.** 기장은 지속적으로 오염실태 조사가 수행된 작물 중 하나이다. 2002년과 2005년산 기장에서는 아플라톡신이 미량 검출되었다(0.098 ng/g) (Oh 등, 2007). 2012년산 기장(16점) 중에서는 13%에서 아플라톡신(총합)이 최대 0.18  $\mu\text{g/kg}$  검출되었다(Kim 등, 2013b). 동일 시료의 38%에서는 데옥시니발레논도 최대 422.0  $\mu\text{g/kg}$  검출되었다. 2013년 기장과 조에서

는 T-2 독소가 각각 4.7  $\mu\text{g/kg}$ 과 4.4  $\mu\text{g/kg}$  검출되었는데 이는 곡류에서 검출된 T-2/HT-2 독소의 최대 오염수준이었다(Paek과 Kang, 2015). 2016년 이전 생산된 것으로 추정되는 유통 기장을 대상으로 11종의 곰팡이독소를 분석한 결과는 기장이 아플라톡신 B1 & B2, 푸모니신 B1 & B2, 데옥시니발레논, 니발레논, 제랄레논 등 7종의 곰팡이독소에 오염되었음을 보여주었다(Kim 등, 2017a). 아플라톡신 B1은 9%의 시료에서 최대 5.6 ng/g, 푸모니신 B1은 52%에서 최대 32.6 ng/g, 데옥시니발레논과 니발레논은 각각 25%와 16%에서 최대 212 ng/g, 102.0 ng/g, 제랄레논은 14%에서 최대 61.5 ng/g 검출되었다.

2016-2017년 기장(5점)에서는 오크라톡신 A가 최대 4.8  $\mu\text{g/kg}$  (기장), 조(5점)에서는 푸모니신 B1이 43.1  $\mu\text{g/kg}$  검출되었다(Kim 등, 2017b). 2017-2018년 기장(9점)과 조(7점)에서는 푸모니신(B1+B2)이 각각 최대 46.0  $\mu\text{g/kg}$ , 57.5  $\mu\text{g/kg}$  검출되었으며 제랄레논은 기장에서 최대 64.6  $\mu\text{g/kg}$ , 조에서 최대 21.5  $\mu\text{g/kg}$ 이 검출되었다(Yang 등, 2019). 2017년산과 2018년산을 각각 조사한 연구에서는 2017년산 기장(18점)이 니발레논(66.7%, 최대 149.0  $\mu\text{g/kg}$ ), 제랄레논(90.9%, 최대 35.7  $\mu\text{g/kg}$ )에 오염된 반면 2018년산(8점)은 데옥시니발레논(12.5%, 140.0  $\mu\text{g/kg}$ ), 제랄레논(12.5%, 9.2  $\mu\text{g/kg}$ ), 푸모니신(B1+B2) (25%, 최대 114.0  $\mu\text{g/kg}$ )에 오염되었다고 보고하였다(Lee 등, 2020). 2019년산 기장(24점)에서는 데옥시니발레논(45.8%, 최대 861.8 ng/g), 니발레논(41.7%, 최대 433.2 ng/g), 제랄레논(62.5%, 최대 117.7 ng/g), 푸모니신(총합) (37.5%, 최대 96.7 ng/g), T-2/HT-2 독소(8.3%, 최대 338.8 ng/g)가 각각 검출되어 제랄레논이 최대기준을 초과하였다(Choi 등, 2021).

이상을 종합하면 기장과 조에 가장 많이 발생한 독소는 푸모니신과 제랄레논으로 분석한 모든 시료에서 검출되었다. 하지만 푸모니신의 오염수준은 최대 114  $\mu\text{g/kg}$ 으로 낮은 편이었고 이외 데옥시니발레논과 니발레논, 아플라톡신과 오크라톡신도의 오염수준도 모두 최대기준 미만이었다.

**옥수수.** 옥수수는 쌀과 보리 다음으로 자주 조사된 작물이다. 옥수수를 이용한 가공식품(1996년 수집, 총 76점)은 푸모니신 B1이 과자(71.4%), 플레이크(40.0%), 팝콘용 옥수수(41.7%), 전분(37.5%)에서 검출되었으나 오염수준은 팝콘용 옥수수(최대 1,010 ng/g)에서 가장 높았고 다음은 전분(332 ng/g), 과자(188 ng/g), 플레이크(165 ng/g) 순이었다(Kim 등, 2002). 1998-1999년산 옥수수와 이들의 가공품에서는 옥수수가루와 옥수수 스낵에서 푸모니신 B1(43-119 ng/g)과 아플라톡신 B1(8-11 ng/g)이 검출되어 아플라톡신의 최대기준을 초과하였다(Park 등, 2002a). 동일한 시료에서 제랄레논은 옥수수 18점

중 22%에서 최대 5.8 ng/g, 옥수수 가공품은 47점 중 19%에서 최대 84 ng/g 검출되었다(Park 등, 2002b). 2004-2005년산 건 옥수수 50점 중 4%에서는 최대 48.61 µg/kg(최대기준의 4.8배)의 아플라톡신 B1이 검출되었다(Ok 등, 2007b). 같은 기간 수집한 옥수수(3점)에서는 최대 0.23 µg/g의 부베리신이 검출되었다(Song 등, 2008). 2005-2006년산 옥수수(14점)의 경우 데옥시니발레놀이 71%에서 최대 1,842.3 µg/kg 검출되었고 제랄레논은 64%, 최대 174.9 µg/kg이 검출되어 제랄레논이 최대기준을 초과하였는데 캔옥수수(7점)에서는 데옥시니발레논만 86%에서 최대 187.4 µg/kg이 검출되었다(Ok 등, 2007a). 2005-2008년에 수집된 옥수수과 가공품의 데옥시니발레논 오염수준은 옥수수(96점) 중 77%, 평균 0.166 mg/kg, 캔옥수수(32점) 19%, 평균 0.066 mg/kg, 팝콘용 옥수수(8점) 63%, 평균 0.121 mg/kg이었다(Ok 등, 2009b). 이 연구진은 2007-2008년 수집한 옥수수와 가공품의 데옥시니발레논 오염수준도 조사하였는데 건옥수수 82점 중 78%에서 평균 132.3 µg/kg이 발생하였고 아침식사용 옥수수 시리얼(18점)의 33%에서는 최대 36.5 µg/kg이 검출되었다(Ok 등, 2009a).

2009년에 수집한 건옥수수(19점)에서는 데옥시니발레놀, 니발레놀, 제랄레논, 푸모니신이 이전과 달리 모두 높은 수준으로 검출되었다. 데옥시니발레논은 26%점에서 최대 2,667 µg/kg, 니발레논은 10.5%점에서 최대 1,364 µg/kg, 제랄레논은 26%에서 최대 385.9 µg/kg이 검출되어 모두 최대기준을 초과하였는데 특히 제랄레논은 3.8배를 초과하였다(Lee 등, 2010). 푸모니신 B1은 68.4%점에서 최대 3,091.8 µg/kg, 푸모니신 B2는 21%에서 최대 624.1 µg/kg, 푸모니신 B3는 15.7%에서 최대 582.1 µg/kg이 각각 검출되는 등 최대기준과 유사한 수준이 검출되었다. 2009년 옥수수의 B형 트리코세신 분석 결과, 25점 중 96%에서 데옥시니발레놀의 오염수준이 491.9 µg/kg으로 가장 높았고 다음이 니발레놀 52%, 129.4 µg/kg이었으며 15-아세틸 데옥시니발레놀(80%, 98.0 µg/kg), 4-아세틸 니발레놀(FUS-X, 24%, 19.1 µg/kg), 3-아세틸 데옥시니발레놀(28%, 6.8 µg/kg) 순으로 나타났다(Ok 등, 2011b). 2011년 옥수수(84점)에서는 1점에서만 푸모니신 B1과 B2가 68.0 µg/kg, 32.9 µg/kg로 각각 검출되었다(Kim 등, 2013a). 2011년 옥수수 유래 식품(9점)의 경우 22.2%에서 제랄레논이 최대 8.5 µg/kg 검출되었고(Choi 등, 2012), 2012년 이전 옥수수 스낵(32점)에서는 제랄레논이 최대 10.3 µg/kg 검출되었다(Ok 등, 2014a). 2012년 옥수수(4점), 건 옥수수(6점)와 옥수수 가공품의 아플라톡신 분석결과는 건 옥수수의 33%에서 아플라톡신(총합)이 최대기준의 2.7배인 최대 27.9 µg/kg가 검출되었고, 데옥시니발레놀에 최대 380.0 µg/kg 오염되었으며 가공품 중 팝콘용 옥수수(10점) 중 60%가 데옥

시니발레놀에 최대 175.8 µg/kg 오염되었음을 보였다(Kim 등, 2013b). 2013년 옥수수(3점)에서는 T-2 독소가 최대 5.2 µg/kg 검출되었다(Paek과 Kang, 2015). 2016년 이전 생산 옥수수를 대상으로 11종의 곰팡이독소를 분석한 결과는 옥수수(~100점)가 8종의 곰팡이독소에 오염되었음을 보여주었다(Kim 등, 2017a). 8종의 독소 중 푸모니신 B1 (47%, 2,990 ng/g), B2 (59%, 620 ng/g)과 데옥시니발레놀(13%, 1,405 ng/g)의 오염수준이 높았던 반면 니발레놀(18%, 570 ng/g), 3-아세틸 데옥시니발레놀(2%, 27.7 ng/g), 제랄레논(7%, 14.7 ng/g), T-2 독소(2%, 13.7 ng/g)는 미량이, 아플라톡신 B1은 1%에서 5.7 ng/g이 검출되었다. 2017-2018년 옥수수 1점에서는 푸모니신이 738.5 µg/kg 검출되었고 옥수수 가공품(5점) 중 3점에서 푸모니신(B1+B2)이 최대 8.4 µg/kg, 제랄레논이 1점에서 507.6 µg/kg 검출되어 제랄레논 최대기준의 5배를 초과하였다(Yang 등, 2019).

이상의 결과를 종합하면 옥수수와 옥수수 가공품에는 데옥시니발레놀의 오염이 주로 발생하였는데 건옥수수의 오염수준이 특히 높아 최대기준을 초과하는 사례가 종종 있었다. 다음으로 푸모니신과 제랄레논, 아플라톡신과 니발레놀도 검출되었다. 옥수수와 가공품에는 데옥시니발레놀, 아플라톡신과 제랄레논의 최대기준 초과 사례가 총 6회 보고되었다.

**수수.** 수수는 2010년 이후 오염실태 조사가 실시되었다. 2011년산 수수 3점 중 1점에서 아플라톡신 B1이 0.32 µg/kg 검출되었고(Park 등, 2013), 2012년산 수수(11점)의 18%에서는 아플라톡신(총합)이 최대 0.30 µg/kg, 데옥시니발레논은 55%에서 최대 202.4 µg/kg 검출되었다(Kim 등, 2013b). 2013년 수수에서는 T-2/HT-2 독소가 각각 37.1 µg/kg, 5.4 µg/kg 검출되었다(Paek과 Kang, 2015). 2016년 이전 생산으로 추정되는 수수에서는 아플라톡신 B1, 푸모니신(B1+B2), 데옥시니발레놀, 니발레놀, 제랄레논이 검출되었다. 오염빈도와 수준은 아플라톡신 4%, 최대 1.7 ng/g, 푸모니신 B1 95%, 최대 890.0 ng/g, 푸모니신 B2 89%, 최대 223.5 ng/g, 데옥시니발레놀 70%, 최대 257.0 ng/g, 니발레놀 53%, 최대 211.5 ng/g, 제랄레논 62%, 최대 313.0 ng/g으로 제랄레논의 오염이 최대기준의 3배였다(Kim 등, 2017a). 2016-2017년 수수(8점)에서는 푸모니신 B1과 B2, 제랄레논이 각각 최대 351.1 µg/kg, 20.7 µg/kg, 28.6 µg/kg 검출되었다(Kim 등, 2017b). 2017-2018년 수수(8점)에서도 푸모니신(B1+B2)과 제랄레논이 검출되었는데 각각의 오염빈도와 최대수준은 75%, 166.7 µg/kg와 50%, 34.0 µg/kg이었다(Yang 등, 2019). 2017년과 2018년산 수수에서는 데옥시니발레놀, 니발레놀, 제랄레논과 푸모니신이 모든 시료에서 검출되었다. 2017년산 수수 45점 중 33.3%에서 데옥시니발레놀이 최대 159.0 µg/

kg, 니발레놀은 46.7%, 최대 206.0 µg/kg, 제랄레논은 96.9%, 최대 55.9 µg/kg, 푸모니신 B1은 46.7%, 최대 538.0 µg/kg, 푸모니신 B2는 66.7%, 최대 148.0 µg/kg 발생하였다(Lee 등, 2020). 반면 2018년산 수수(15점)의 오염률과 오염수준은 니발레놀을 제외하고 2017년보다 높아져서 데옥시니발레놀 33.3%, 최대 177.2 µg/kg, 제랄레논 53.3%, 최대 533.6 µg/kg, 푸모니신 B1 86.7%, 최대 1,301.6.0 µg/kg, 푸모니신 B2 46.7%, 최대 280.1 µg/kg으로 제랄레논의 오염이 또다시 최대기준을 초과하였다.

이상, 수수에서는 제랄레논이 최대기준을 초과하는 사례가 2016년 이전과 2018년에 2회 발생하였다. 데옥시니발레놀, 푸모니신, 니발레놀 외에 아플라톡신도 검출되었지만 이들의 오염수준은 모두 최대기준 미만으로 낮았다.

**귀리.** 귀리의 곰팡이독소 오염실태 조사는 2018년에 처음으로 수행되었다. 2017-2018년산 귀리(7점)와 2017년산 귀리(46점)에서는 곰팡이독소가 검출되지 않았으나(Yang 등, 2019) 2018년산 귀리 42점에서는 데옥시니발레놀, 니발레놀, 제랄레논과 푸모니신이 모두 검출되었다. 2018년산 귀리의 오염빈도와 오염수준은 데옥시니발레놀 14.3%, 최대 492.0 µg/kg, 니발레놀 66.7%, 최대 3,277.0 µg/kg, 제랄레논 4.8%, 최대 6.9 µg/kg, 푸모니신 B2 2.4%, 12.9 µg/kg으로 니발레놀의 오염이 가장 높은 것으로 나타났다(Lee 등, 2020). 귀리의 니발레놀 오염이 높은 것은 보리, 밀, 쌀과 유사하였다.

**울무.** 울무는 2010년 이후 오염실태조사가 실시되었다. 2012년 울무는 13점 중 7.7%가 아플라톡신 B1에 0.02 µg/kg 오염되었는데 데옥시니발레놀은 85%가 최대 754.4 µg/kg에 오염되었다(Kim 등, 2013b). 2016-2017년 울무(12점)에서는 푸모니신 B1, 푸모니신 B2, 제랄레논이 최대 509.2 µg/kg, 50.96 µg/kg, 26.5 µg/kg 각각 검출되었다(Kim 등, 2017b). 2017-2018년 울무(5점)에서는 제랄레논과 푸모니신의 오염빈도가 각각 80%, 100%이었으며 제랄레논 수준이 최대 90.6 µg/kg로 푸모니신(B1+B2) (최대 66.0 µg/kg) 보다 높았다(Yang 등, 2019). 울무 가공품의 오염수준은 더 높아 제랄레논이 최대 166.3 µg/kg로 최대기준을 초과하였고, 푸모니신은 최대 103 µg/kg이 검출되었다. 2017년과 2018년산 울무의 데옥시니발레놀, 니발레놀, 제랄레논과 푸모니신의 오염 조사 결과, 모든 시료에서 이 독소들이 검출되었다(Lee 등, 2020). 2018년 시료의 오염수준이 데옥시니발레놀(최대 730.0 µg/kg)과 푸모니신 B1(최대 624.0 µg/kg), 푸모니신 B2(최대 179.0 µg/kg)로 2017년보다 높았으며 2017년산은 니발레놀(최대 90.0 µg/kg)과 제랄레논(최대 32.1 µg/kg) 수준이 2018년산 보다 높았다. 울무는 조사건수는 적지만 푸모니

신과 제랄레논의 검출이 두드러졌으며 기장과 유사한 오염양상을 보였다.

**기타 곡류 및 가공품.** 메밀, 호밀 등 잡곡과 다양한 곡류 가공품의 곰팡이독소 오염실태 조사 결과도 다수 보고되었다. 2005-2008년에 수집된 호밀(5점)은 데옥시니발레놀에 100% 오염되었으나 평균 0.095 mg/kg으로 오염수준은 높지 않았다(Ok 등, 2009b). 2012년산 메밀(7점)에서는 1점에서만 데옥시니발레놀이 20 µg/kg 검출되었다(Kim 등, 2013b). 2005년-2008년산 곡류 가공품에서는 데옥시니발레놀이 검출되었는데 오염빈도와 최대수준은 비스킷 38%, 0.025 mg/kg, 빵 38%, 0.052 mg/kg, 시리얼 24-38%, 0.024 mg/kg이었다(Ok 등, 2009b). 2008년산 과자, 빵, 면 등 다양한 곡류 가공품 432점의 제랄레논 분석결과 전분, 침출차, 선식 등이 오염되었고 이 중 선식의 오염률이 66.7%로 가장 높았던 반면 최대 오염수준은 침출차(34점)의 41%에서 53.76 µg/kg로 나타났다(Jang 등, 2011). 2009년산 잡곡과 아침식사용 시리얼에서는 다양한 B형 트리코페신(데옥시니발레놀, 니발레놀과 이들의 아세틸 유도체 3종)이 모두 검출되었다. 이 중 시리얼(18점)의 니발레놀 오염이 가장 높아 61%에서 최대 1,096.8 µg/kg이 검출되었으며 데옥시니발레놀은 57.6 µg/kg이었고 아세틸 유도체들은 10.1 µg/kg 이하로 나타났다(Ok 등, 2011b). 잡곡(40점)은 데옥시니발레놀의 오염이 가장 높아 95%에서 최대 309.9 µg/kg이 검출되었고 다음으로 니발레놀(88%, 88.9 µg/kg), 15-아세틸 데옥시니발레놀(25%, 111.5 µg/kg), 4-아세틸 니발레놀(33%, 22.5 µg/kg), 3-아세틸 데옥시니발레놀(15%, 6.4 µg/kg) 순으로 나타났다(Ok 등, 2011b). 2011년 곡류 가공품 60점의 제랄레논 분석결과는 미숫가루, 스낵 등이 각각 31.6%와 4.8%에서 최대 29.7 µg/kg, 2.2 µg/kg 오염되었음을 보여주었다(Choi 등, 2012). 2012년 이전 곡류 가공품의 제랄레논 분석결과는 건면(35점), 즉석면(30점), 분유(36점)의 1점, 2점, 5점이 각각 오염되었으며 최대수준은 각각 8.1 µg/kg, 3.6 µg/kg, 17.6 µg/kg이었다(Ok 등, 2014a).

2012년 유통 곡물가루에서는 아플라톡신과 데옥시니발레놀이 검출되었다. 튀김가루는 아플라톡신 B1만 최대 0.30 µg/kg이 검출되었고 베이커용 가루와 볶은가루에서는 아플라톡신(총합)이 최대 0.13 µg/kg, 데옥시니발레놀이 최대 147.5 µg/kg 검출되었다(Kim 등, 2013b). 2013년 이전 생산된 선식(47점)의 경우 오염수준은 푸모니신이 최대 66.4 µg/kg으로 가장 높았지만 오염빈도는 제랄레논이 100% (최대 29.3 µg/kg)로 가장 높았고 데옥시니발레놀과 오크라톡신 A는 최대 48.3 µg/kg과 4.1 µg/kg이 각각 검출되었다(Jung 등, 2015). 2016년 이전 생산 잡곡은 11종의 곰팡이독소 중 8종에 오염되었다(Kim 등, 2017a).

잡곡의 최대 오염 독소는 아플라톡신 B1으로 4%의 빈도로 최대 12.4 ng/g이 검출되어 최대기준(B1만 10.0 µg/kg)을 초과하였다. 니발레놀과 데옥시니발레놀의 오염수준은 각각 40% (최대 175 ng/g), 19% (최대 162 ng/g)이었으며 푸모니신 B1과 B2의 오염빈도는 각각 74%와 58%로 높았지만 오염수준은 각각 최대 80.1 µg/kg과 22.1 µg/kg으로 높지 않았다. 제랄레논과 오크라톡신 A, HT-2 독소는 각각 47% (최대 36.0 µg/kg), 1% (0.5 µg/kg), 1% (4.3 µg/kg)에서 검출되었다.

이들 독소 외에 국내에서는 처음으로 2018년 이전 생산 곡류와 곡류가공품을 대상으로 *Alternaria* 독소의 오염실태가 보고되었다. *Alternaria* 독소는 *Alternaria*종이 생성하는 곰팡이독소로 70여종이 알려져 있지만(Escrivá 등, 2017) 최대기준이 설정되어 있지 않아 상대적으로 관심과 연구가 적은 편이다. 61점의 곡류와 36점의 가공품은 모두 알터나리올(alternariol), 알터나리올 모노메틸 에테르(alternariol monomethyl ether, AME), 텐톡신(tentoxin)에 오염된 것으로 나타났다(Kim 등, 2019). 곡류에서는 AME (최대 70.89 µg/kg), 가공품에서는 텐톡신(46.64 µg/kg)의 수준이 가장 높았고 알터나리올은 곡류와 가공품에서 최대 13.14 µg/kg 이하로 검출되었다. 이 시료들에서는 *Fusarium*이 분비하는 뷰베리신과 에니아틴도 검출이 되었다. 뷰베리신은 가공품의 오염수준이 최대 27.61 µg/kg으로 곡류보다 높았고 에니아틴 중에서는 에니아틴 B가 곡류와 가공품에서 최대 6.28 µg/kg (곡류)이 검출되었다. 2017-2018년에 생산된 다양한 곡류 가공품 24점(퀴노아, 누룽지, 곡물가루 등)에서는 곰팡이독소가 검출되지 않았다(Yang 등, 2019).

이상의 결과를 종합하면, 메밀과 호밀에서는 모두 데옥시니발레놀만 검출되었으나 잡곡 및 곡류 가공품은 데옥시니발레놀과 제랄레논이 주로 오염되었고 아플라톡신과 오크라톡신이 검출되는 사례도 있었다.

## 결론

우리나라 곡류에 공통적으로 가장 많이 발생한 곰팡이독소는 데옥시니발레놀이었으며 다음은 제랄레논이었다. 니발레놀은 분석횟수가 데옥시니발레놀 보다 적었지만 분석한 모든 시료에서 검출이 되었다. 우리나라의 곡류에 우점하는 붉은곰팡이는 니발레놀을 주로 생성하기 때문에(Jang 등, 2019) 곡류의 오염실태조사에 데옥시니발레놀과 더불어 니발레놀이 반드시 포함되어야 할 것으로 보인다. 특히 보리와 더불어 붉은곰팡이의 주요 기주인 밀은 최근 10년간 조사가 실시되지 않은 것으로 나타나 오염실태조사가 시급한 것으로 판단된다. 데옥시니발레놀과 니발레놀의 아세틸 유도체들은 분석한 대부분의 곡류에

서 검출되었는데 이 유도체들은 데옥시니발레놀 또는 니발레놀과 함께 생성되고 데옥시니발레놀 보다 낮지만 독성을 가지고 있으므로 곰팡이독소 오염실태조사에 함께 포함되는 것이 필요하다. 푸모니신은 옥수수과 수수 외에 쌀, 기장, 울무에서도 빈번하게 검출되었다. 비록 오염수준은 낮지만 푸모니신 오염이 옥수수과 수수에 국한되지 않으므로 쌀과 잡곡의 푸모니신 오염실태를 지속적으로 파악할 필요가 있을 것으로 보인다. 아플라톡신은 보리와 메밀을 제외한 모든 곡류에서, 오크라톡신은 보리, 기장, 쌀에서 검출되었는데 붉은곰팡이 독소에 비해 불 특정한 오염의 결과로 추정된다. 곡류 가공품의 경우 원료 농산물의 오염 양상과 유사한 결과를 나타내므로 원료 관리를 통해 가공품의 안전성을 높여야 한다.

검출된 곰팡이독소의 오염 수준은 대부분 국내의 최대기준 미만이었지만 곰팡이독소의 생성 여부는 곰팡이 발생의 특성상 환경변화에 따라 크게 영향을 받으므로 곡류의 주요 곰팡이독소 오염실태조사는 지속적으로 수행되어야 한다. 이상의 분석 결과는 국내 농산물 중 맥류, 옥수수과 수수 외에 쌀, 기장, 울무도 곰팡이독소에 취약함을 보여준다. 특히 우리 국민의 주곡인 쌀의 경우 붉은곰팡이 독소 외 푸모니신, 아플라톡신 등 다양한 곰팡이독소가 발생하고 있으므로 지속적인 모니터링과 수확 후 관리가 필요하다. 또한, 국내 곡류의 곰팡이독소 오염실태를 조사할 때 모든 곡류는 데옥시니발레놀과 아세틸 유도체, 니발레놀, 제랄레논을 기본항목으로 포함하고 옥수수, 수수, 쌀, 울무, 기장은 푸모니신을 추가로 조사할 것을 제안하는 바이다.

## 요약

이 논문에서는 2000년 이후 우리나라의 곡류와 곡류 가공품의 곰팡이독소 오염실태를 보고한 논문들을 작물별로 분석하였다. 보리, 쌀, 옥수수는 다른 곡류보다 많이 조사되었다. 모든 곡류와 곡류의 가공품에 공통으로 발생한 독소는 데옥시니발레놀과 제랄레논이었다. 니발레놀은 분석한 모든 시료에서 검출되었지만 보리, 쌀, 귀리에서 더욱 빈번하거나 주로 검출되었다. 푸모니신은 옥수수과 수수 외에 울무, 기장, 쌀에서도 검출되었다. 울무와 기장은 푸모니신과 제랄레논이 가장 빈번하게 검출되는 오염양상이 유사하였다. 가장 빈번하게 검출수준이 국내기준(최대기준)을 초과한 곰팡이독소는 제랄레논이었고 다음은 데옥시니발레놀과 아플라톡신 순이었다. 그러나 대부분의 오염수준은 각 곰팡이독소의 최대기준 미만이었다. 이 결과는 보리, 쌀, 옥수수, 수수, 기장, 울무 등이 다른 곡류에 비해 곰팡이독소 오염에 취약하며 따라서 이들 농산물의 지속적인 모니터링과 안전관리가 필요함을 보여준다.

## Conflicts of Interest

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

## Acknowledgments

This study was carried out with the support of “Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ014895)”, National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration, Republic of Korea.

## References

- Choi, E. J., Kang, S. T., Jung, S. Y., Shin, J. M., Jang, M. S., Lee, S. M. et al. 2012. Analysis and uncertainty estimation of zearalenone in cereal-based products by LC-MS/MS. *Korean J. Food Sci. Technol.* 44: 658-665.
- Choi, J.-H., Nah, J.-Y., Lee, M.-J., Jang, J.-Y., Lee, T. and Kim, J. 2021. *Fusarium* diversity and mycotoxin occurrence in proso millet in Korea. *LWT* 141: 110964.
- Del Ponte, E. M., Moreira, G. M., Ward, T. J., O'Donnell, K., Nicolli, C. P., Machado, F. J. et al. 2022. *Fusarium graminearum* species complex: a bibliographic analysis and web-accessible database for global mapping of species and trichothecene toxin chemotypes. *Phytopathology* 112: 741-751.
- Desjardins, A. E. 2006. *Fusarium* Mycotoxins: Chemistry, Genetics and Biology. APS Press, St. Patul, MN, USA. 260 pp.
- Eriksen, G. S., Pettersson, H. and Lundh, T. 2004. Comparative cytotoxicity of deoxynivalenol, nivalenol, their acetylated derivatives and de-epoxy metabolites. *Food Chem. Toxicol.* 42: 619-624.
- Escrivá, L., Oueslati, S., Font, G. and Manyes, L. 2017. *Alternaria* mycotoxins in food and feed: an overview. *J. Food Qual.* 2017: 1569748.
- Jang, J. Y., Baek, S. G., Choi, J.-H., Kim, S., Kim, J., Kim, D.-W. et al. 2019. Characterization of nivalenol-producing *Fusarium asiaticum* that causes cereal head blight in Korea. *Plant Pathol. J.* 35: 543-552.
- Jang, M.-R., Lee, C.-H., Choi, I.-S., Shin, C.-S., Kim, J.-H., Jang, Y.-M. et al. 2011. Analysis of zearalenone contamination in cereal-based products using high performance liquid chromatography fluorescence detector and ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Korean J. Food Sci. Technol.* 43: 224-229.
- Jung, S.-Y., Choe, B.-C., Choi, E.-J., Jeong, H.-J., Hwang, Y.-S., Shin, G.-Y. et al. 2015. Survey of mycotoxins in commonly consumed Korean grain products using an LC-MS/MS multimycotoxin method in combination with immunoaffinity clean-up. *Food Sci. Biotechnol.* 24: 1193-1199.
- Kim, D.-B., Song, N.-E., Nam, T. G., Lee, S., Seo, D. and Yoo, M. 2019. Occurrence of emerging mycotoxins in cereals and cereal-based products from the Korean market using LC-MS/MS. *Food Addit. Contam. Part A Chem. Anal. Control Expo. Risk Assess.* 36: 289-295.
- Kim, D.-H., Hong, S.-Y., Kang, J. W., Cho, S. M., Lee, K. R., An, T. K. et al. 2017a. Simultaneous determination of multi-mycotoxins in cereal grains collected from South Korea by LC/MS/MS. *Toxins* 9: 106.
- Kim, D.-H., Jang, H.-S., Choi, G.-I., Kim, H.-J., Kim, H.-J., Kim, H.-L. et al. 2013a. Occurrence of mycotoxins in Korean grains and their simultaneous analysis. *Korean J. Food Sci. Technol.* 45: 111-119.
- Kim, E.-K., Shon, D.-H., Chung, S.-H. and Kim, Y.-B. 2002. Survey for fumonisin B<sub>1</sub> in Korean corn-based food products. *Food Addit. Contam.* 19: 459-464.
- Kim, J.-K., Kim, Y.-S., Lee, C.-H., Seo, M. Y., Jang, M. K., Ku, E.-J. et al. 2017b. A study on the safety of mycotoxins in grains and commonly consumed foods. *J. Food Hyg. Saf.* 32: 470-476.
- Kim, K., Nam, M., Nam, B.-R., Ryu, H.-J., Song, J.-E., Shim, W.-B. et al. 2010. Determination of total aflatoxins in foods by parallelism of ELISA and LC/MS/MS. *J. Environ. Health Sci.* 36: 52-60.
- Kim, Y.-S., Kim, Y.-S., Kim, M.-G., Lee, S.-B., Lee, J.-Y., Oh, S.-H. et al. 2013b. The safety assessment of aflatoxins and deoxynivalenol in cereals and their products. *J. Food Hyg. Saf.* 28: 158-167.
- Lee, M. J., Wee, C.-D., Ham, H., Choi, J.-H., Baek, J. S., Lim, S. B. et al. 2020. Survey on *Fusarium* mycotoxin contamination in oat, sorghum, adlay, and proso millet during the harvest season in Korea. *J. Food Hyg. Saf.* 35: 13-22.
- Lee, S., Lee, T., Kim, M., Yu, O., Im, H. and Ryu, J.-G. 2013. Survey on contamination of *Fusarium* mycotoxins in 2011-harvested rice and its by-products from rice processing complexes in Korea. *Res. Plant Dis.* 19: 259-264.
- Lee, S.-H., Son, S. W., Nam, Y. J., Shin, J. Y., Lee, S., Kim, M. et al. 2010. Natural occurrence of *Fusarium* mycotoxins in field-collected maize and rice in Korea in 2009. *Res. Plant Dis.* 16: 306-311.
- Lee, T., Lee, S., Kim, L.-H. and Ryu, J.-G. 2014. Occurrence of fungi and *Fusarium* mycotoxins in the rice samples from rice processing complexes. *Res. Plant Dis.* 20: 289-294.
- Lee, T., Lee, S.-H., Lee, S.-H., Shin, J. Y., Yun, J.-C., Lee, Y.-W. et al. 2011. Occurrence of *Fusarium* mycotoxins in rice and its milling by-products in Korea. *J. Food Prot.* 74: 1169-1174.
- Minervini, F., Fornelli, F. and Flynn, K. M. 2004. Toxicity and apoptosis induced by the mycotoxins nivalenol, deoxynivalenol and fumonisin B<sub>1</sub> in a human erythroleukemia cell line. *Toxicol. In Vitro* 18: 21-28.
- Oh, K. S., Suh, J., Sho, Y.-S., Park, S., Choi, W.-J., Lee, J.-O. et al. 2007. Exposure assessment of total aflatoxin in foods. *Korean J. Food Sci. Technol.* 39: 25-28.
- Ok, H. E., Chang, H.-J., Choi, S.-W., Cho, T. Y., Oh, K. S. and Chun, H. S. 2009a. Occurrence and intake of deoxynivalenol in cereal-based products marketed in Korea during 2007-2008. *Food Ad-*

- dit. *Contam. Part B Surveill.* 2: 154-161.
- Ok, H. E., Chang, H.-J., Choi, S.-W., Lee, N., Kim, H. J., Koo, M. S. et al. 2007a. Co-occurrence of deoxynivalenol and zearalenone in cereals and their products. *J. Food Hyg. Saf.* 22: 375-381.
- Ok, H. E., Choi, S.-W., Chang, H. J., Chung, M.-S. and Chun, H. S. 2011a. Occurrence of five 8-ketotrichothecene mycotoxins in organically and conventionally produced cereals collected in Korea. *Food Control* 22: 1647-1652.
- Ok, H. E., Choi, S.-W., Chung, S. H., Kang, Y.-W., Kim, D.-S. and Chun, H. S. 2011b. Natural occurrence of type-B trichothecene mycotoxins in Korean cereal-based products. *Food Addit. Contam. Part B Surveill.* 4: 132-140.
- Ok, H. E., Choi, S.-W., Kim, M. and Chun, H. S. 2014a. HPLC and UPLC methods for the determination of zearalenone in noodles, cereal snacks and infant formula. *Food Chem.* 163: 252-257.
- Ok, H. E., Kim, D. M., Kim, D., Chung, S. H., Chung, M.-S., Park, K. H. et al. 2014b. Mycobiota and natural occurrence of aflatoxin, deoxynivalenol, nivalenol and zearalenone in rice freshly harvested in South Korea. *Food Control* 37: 284-291.
- Ok, H. E., Kim, H. J., Cho, T. Y., Oh, K. S. and Chun, H. S. 2009b. Determination of deoxynivalenol in cereal-based foods and estimation of dietary exposure. *J. Toxicol. Environ. Health A* 72: 1424-1430.
- Ok, H. E., Kim, H. J., Shim, W. B., Lee, H., Bae, D.-H., Chung, D.-H. et al. 2007b. Natural occurrence of aflatoxin B1 in marketed foods and risk estimates of dietary exposure in Koreans. *J. Food Prot.* 70: 2824-2828.
- Paek, O. and Kang, T. 2015. Survey and method validation of simultaneous quantitative analysis of T-2 and HT-2 toxins in cereals. *Korean J. Food Preserv.* 22: 559-566.
- Park, J. W., Choi, S.-Y., Hwang, H.-J. and Kim, Y.-B. 2005a. Fungal mycoflora and mycotoxins in Korean polished rice destined for humans. *Int. J. Food Microbiol.* 103: 305-314.
- Park, J. W., Chung, S.-H. and Kim, Y.-B. 2005b. Ochratoxin A in Korean food commodities: occurrence and safety evaluation. *J. Agric. Food Chem.* 53: 4637-4642.
- Park, J. W., Kim, E. K., Shon, D. H. and Kim, Y. B. 2002a. Natural co-occurrence of aflatoxin B<sub>1</sub>, fumonisin B<sub>1</sub> and ochratoxin A in barley and corn foods from Korea. *Food Addit. Contam.* 19: 1073-1080.
- Park, J. W., Kim, E. K., Shon, D. H. and Kim, Y. B. 2002b. Occurrence of zearalenone in Korean barley and corn foods. *Food Addit. Contam.* 19: 158-162.
- Park, J.-W., Yoo, M.-S., Kuk, J.-H., Ji, Y.-A. and Lee, J.-H. 2013. Simultaneous determination and monitoring of aflatoxin and ochratoxin A in food. *J. Food Hyg. Saf.* 28: 75-82.
- Pei, S. C., Lee, W. J., Kim, S. S. and Lee, Y. W. 2004. Occurrence of deoxynivalenol in Korean barley and barley products. *J. Am. Soc. Brew. Chem.* 62: 93-96.
- Ryu, J.-G., Lee, S., Lee, S.-H., Son, S.-W., Nam, Y. J., Kim, M. et al. 2011. Natural occurrence of *Fusarium* head blight and its mycotoxins in 2010-harvested barley and wheat grains in Korea. *Res. Plant Dis.* 17: 272-279.
- Song, H.-H., Lee, H.-S. and Lee, C. 2008. Survey of beauvericin contamination in Korean grains by HPLC and the production of beauvericin and enniatin derivatives by *Fusarium oxysporum* KFCC 11363p. *J. Food Hyg. Saf.* 23: 73-79.
- van der Lee, T., Zhang, H., van Diepeningen, A. and Waalwijk, C. 2015. Biogeography of *Fusarium* graminearum species complex and chemotypes: a review. *Food Addit. Contam. Part A Chem. Anal. Control Expo. Risk Assess.* 32: 453-460.
- Yang, Y., Lee, H. H., Kim, A. G., Ryu, K. Y., Choi, S. Y., Seo, D. R. et al. 2019. Survey of mycotoxin contamination in grains and grain products. *J. Food Hyg. Saf.* 34: 205-211.