국내외 축산물과 사료내 곰팡이독소에 대한 최신 오염 현황 및 허용기준

Current Status of Worldwide Mycotoxin Contamination and Regulations in Animal-Derived Foods and Animal Feed

배동렬, 서건호*

Dongryeoul Bae, Kun-Ho Seo*

건국대학교 수의과대학 KU식품안전건강연구소

KU Center for Food Safety

1. 서론

곰팡이류(fungi)는 진핵생물에 속하며 효모(yeasts), 곰팡이(molds)와 버섯(mushrooms)을 포함한다. 곰팡이류의 세포벽을 구성하고 있는 주요성분인 키틴(chitin)에 의해 곰팡이류는 다른 식물, 세균 및 일부 원생생물들(protists)과 구별되며, 그들과 다른 생물계(kingdom)를 형성하고 있다. 곰팡이류는 동물과 마찬가지로 종속영양생물(heterotroph)로 자신의 서식환경에서 그들의 생존과 번식을 위해 필요로하는 유기물들을 얻어야만 한다. 그런 자신들의 주위환경에서 곰팡이류는 직접적으로 그들의 생존 또는 연속성과는 큰 관련이 없어 보이지만 자신들의 서식환경에서 다른 경쟁적 곰팡이들과 세균들로부터 자신들을 보호하고 그들이 처한 경쟁관계에서 벗어나기 위해 곰팡이독소(mycotoxins)와 같은 2차 대사산물을 생산한다. 이런 곰팡이독소들은 주로 *Aspergillus* spp., *Fusarium* spp., *Penicillium* spp.와 같은 사상균들에 의해 생성되며 이들의 최적 성장온도(0-33℃), 화학적 구조, 동물에 대한 독성(toxicity)의 정도가 다양하게 나타난다(Miller, 1998; Murphy et al., 2006). 현재까지 알려진 수천 종의 곰팡이들 중에서 약400여 가지 이상의 다양한 곰팡이독소들이 알려졌으나, 그들 중 인간을 포함한 동물의 건강과 행동에 실제로 영향을 끼치는 독소들은 극히 일부인 것으로 밝혀졌다. 위해한 곰팡이독소로는 독소를 생산하는 사상균과 독소들의 특징에 따라 크게 6가지 종류(아플라톡신, aflatoxins; 트라이코쎄신, trichothecenes; 푸모니신, fumonisins; 제랄레논, zearalenone; 오크라특신, ochratoxin A; 맥각 알카로이드, ergot alkaloids)로 분류할 수 있다. 특히, 아플라톡신, 푸모니신, 트라이코쎄신, 오크라톡신 등이 인간 및 동물의 질병과 생산성에 깊은 연관성을 보인다. 축산분야 내 곰팡이독소들의 주요 원인체로는 사료작물과 식육 및 유제품 등을 포함하고 있다(darwish et al., 2014). 사료작물 중에서는 특히, 곡류(옥수수, 수수, 보리, 밀), 면실박,

* Correspondence to: Kun Ho Seo, Ph D.
Center for One Health, College of Veterinary Medicine, Konkuk University,
1 Hwayang-dong, Gwangjin-gu, Seoul 05029, Republic of Korea.
Tel: +82-2-450-4121 Fax: +82-2-3436-4128 E-mail: bracstu3@konkuk.ac.kr.

땅콩 깻묵 및 다른 콩과식물에서 주로 발생한다. 따라서, 이런 곰팡이독소들은 식품과 동물 사료 등에서 규제의 대상이 되며, 이에 대한 지속적인 모니터링과 연구가 진행되어 오고 있다. 본론에서는 축산분야 내 유제품 및 육제품류와 가축용 사료에 포함되어 있는 곰팡이독소들에 대한 세계 주요국들의 최근 모니터링 자료와 허용기준에 대하여 소개하고자 한다.

본론

사료와 축산물에서 곰팡이독소에 대한 규제현황

축산분야에 있어서 여러 종류의 곰팡이독소들은 사료용 곡물(grains)과 작물(forage crop)의 생산, 수확, 수송 및 저장 동안 또는 직 · 간접적으로 그 원료들을 사용한 혼합사료(compound feed) 및 배합사료(complete feed), 그리고 그 오염된 사료 급여를 통해 생산된 축산식품(우유, 고기 및 달걀 등)에서 빈번히 발생한다. 따라서, 가축사료의 원료 및 완제품과 축산식품 내 곰팡이독소들의 오염을 줄이기 위해서 세계 각국들은 우수농산물관리제도(good agricultural practices, GAP)와 우수제조관리기준(good manufacturing practices, GMP) 및 위해요소중점관리기준(hazard analysis of critical control points, HACCP) 등과 같은 생산, 제조가공기술 및 품질관리 프로그램들의 현장적용을 위해 지속적인 노력을 해오고 있다. 그럼에도 불구하고 한번 발생한 곰팡이독소들을 축산식품이나 가축용 사료로부터 완전히 제거하는 것은 현실적으로 불가능하다. 특히, 이들 곰팡이독소들은 전통적인 식품 및 사료가공 제조산업에서 사용되는 200℃ 이상의 높은 열처리 과정에서도 화학적으로 매우 안정한 구조를 유지하는 자연적인 특성과 함께 최근에는 식품, 곡물 및 사료 등의 무역 자유화의 급속한 증가로 인해 축산식품과 가축용 사료 원료와 완제품에 대해 안전성의 문제가 전세계적으로 점점 더 커지고 있다. 그래서, 상품 내 곰팡이독소의 오염정도는 관련산업 시장에 있어서 상당한 부담으로 작용하며 매우 큰 영향을 끼치고 있다. 그리고, 축산식품에서 검출된 곰팡이독소들의 양이 각국이 설정해 놓은 최대허용량(maximum levels)보다 낮은 농도라 하더라도, 소비자는 오염된 사료를 섭취한 가축들로부터 생산된 식품에 항상 노출되어 있다. 이러한 사실들은 장래 우리의 건강을 위협하는 잠재적인 요소로 충분히 작용할 수 있다. 따라서, UN 식량농업기구(FAO)와 함께 우리나라를 포함한 세계 각국들은 곰팡이독소들에 대해 식품과 동물용 사료에 대해서 최대허용량을 설정하고 있으며 초과하는 오염된 곡물, 사료 및 식품들로부터의 노출을 최소화하고 있다. 또한, 각국은 곰팡이독소들에 관한 엄격한 관리(control) 프로그램들을 개정해 나감과 동시에 축산식품과 동물용사료에 대한 안전성확보 강화를 위해 꾸준히 노력해 오고 있다. 특히, 곰팡이독소들에 대한 인간의 노출량과 독성평가를 위한 다양한 연구와 모니터링을 실행해 오고 있으며, 그 자료들을 적극적으로 활용하여 새로운 규제(regulation) 조항을 제정하고, 또한 규제의 대상과 허용량을 개정해 오고 있다. 표 1은 세계 주요국의 축산식품과 동물사료 내 곰팡이독소에 대한 최대 허용량에 대한 설정 기준을 보여주고 있다.

표 1에서 나타나는 바와 같이, 곰팡이독소들의 기준치는 나라마다 차이가 있음을 알 수 있다. 미국을 포함한 세계 여러 나라에서는 각각의 곰팡이독소의 종류들을 인간과 동물의 건강에 미치는 영향 및 관련산업에 있어서 조절가능한 수준의 정도에 따라서 실행수준(action levels), 권고수준(advisory levels), 그리고 지침수준(guidance levels)으로 구분하여 설정하고 있다. 그 독소 중, 아플라톡신의 기준치에 대해서는 미국, 한국, 일본은 우유를 제외한 모든 식품에 대해 최대허용량을 aflatoxin B1, B2, G1, G2의 전체 양(총아플라톡신)을 합산한 기준으로 각각 20 μg/kg, 15 μg/kg, 10 μg/kg으로 설정하고 있으며 유럽연합(EU)은 식품을 제품별로 세분화하여 4-15 ppb로 기준을 설정하고 있다. 곰팡이독소에 오염된 가축의 젖이나 고기는 그것들을 섭취하는 사람뿐만 아니라 가축 자신들의 질병(간손상, 암유발 또는 면역력저하)이나 낮은 생산성과도 깊은 관련이 있다. 주로 *Aspergillus*

flavus 와 *A. parasiticus*에 의해 생성되는 아플라톡신 B1(AFB1)은 곰팡이독소 중에서도 사람에게 가장 강력한 독성을 나타내고 있다고 알려져 있으며, 국제암연구소(IARC)에서는 인체발암물질들 중에서 이 물질을 위험성이 높은 최고 등급인 1급(group A)으로 규정하고 있다. 그러나, 가축들은 이러한 맹독성의 AFB1을 체내에서 흡수하여 그 독소량을 감소시키거나 또는 독성이 약화된 형태로 전환할 수 있다. 특히, 젖소와 같은 반추가축들은 AFB1이 오염된 사료를 통해 흡수한 대부분의 AFB1을 제1위(rumen) 내 미생물균총(microbiota)이나 간세포들(hepatocytes)의 cytochrome P450 oxidase system을 통해서 생체 내에서 AFM1으로 전환(biotransformation)시킨다(Kuilman et al., 1998; Gallo et al, 2015). 독성이 약화한 AFM1은 마침내 혈액을 통해서 우유로 분비된다. 따라서, 세계 각국들은 우유 및 유가공제품에 대해서 AFB1과 AFM1에 대해서 최대허용량을 설정하고 있다(표 1). 미국에서는 AFM1의 최대허용량을 0.5 ppb (μg/kg)로 정하고 있으나 EU는 AFM1에 대해서는 0.05 ppb로 최대허용 기준을 설정하고 있다. 우리 나라에서는 AFB1과 AFM1 이 두 가지 독소들에 대해서 10 ppb 와 0.5 ppb로 기준을 각각 설정하고 있어서 아플라톡신에 대한 기준이 다른 나라들에 비해 매우 강력하게 설정되어 있음을 알 수 있다. 그러나, 일본은 특별히 유제품에 대한 AFB1과 AFM1에 대한 기준이 현재까지는 설정되어 있지 않다. 조제우유 또는 유아용 조제분유에 대해 한국과 EU는 AFM1에 대해서 0.025 ppb 수준으로 허용량을 엄격하게 설정하고 있으나, 일본과 미국에서는 이런 제품들에 대한 기준이 설정되어 있지 않다. 그리고, 육제품 및 계란제품을 포함하는 축산식품에 대한 아플라톡신의 최대허용량은 특별히 세분화되어 있지는 않으므로 유제품 외 다른 모든 식품기준의 설정 항목에 따라야 할 것으로 보인다. 또한, 유제품을 제외한 축산식품의 경우, 다른 식품들처럼 아플라톡신외 다른 곰팡이독소에 대한 기준은 아직 설정되어 있지 않아 보인다.

축산식품과는 달리 가축용사료에 대해서는 나라마다 여러 종류의 곰팡이독소들에 대해 최대허용량을 설정하고 있지만, 곰팡이독소들에 대한 규제대상의 종류와 허용량에 대해서는 나라마다 다른 제한 기준을 설정하고 있다(표 1). 가축용사료에 대해 EU는 아플라톡신, 데옥시니발레놀, 푸모니신, 제랄레논과 오크라톡신에 대해서, 미국은 아플라톡신, 데옥시니발레놀과 푸모니신에 대해서만, 그리고 일본의 경우는 아플라톡신과 데옥시니발레놀에 대해서만 그 기준을 설정하고 있다. 우리 나라는 사료 내 유해물질의 범위 및 허용기준 제11조 제1항과 관련하여 동물용사료에 대해서는 아플라톡신과 오크라톡신에 대한 허용기준을 설정하고 있다. 추가적으로 관련산업자 또는 구매자를 위한 효율적 품질관리를 위해 사료 내 데옥시니발레놀, 푸모니신, 제랄레논, 트라이코쎄신 A 유형(trichothecene type A, T-2)에 대해서는 권고기준을 설정하고 있다. 곰팡이독소들의 최대허용량에 대해서도 나라별로 원료종류, 제품형태, 대상가축, 가공형태, 또는 수분함량 등과 같은 여러 요소가 각국의 상황에 맞게 예외적이고 세부적인 항목들로 많이 구분되어 있으므로 그 곰팡이독소들에 대한 각각의 설정기준량 또한 다르게 설정되고 있음을 알 수 있다(표 1).

축산물 내 곰팡이독소 오염현황

세계 각국 또는 지역별로 일정한 시기 및 기간 동안 동종의 분석방법을 이용하여 다양한 축산물(유제품, 육제품, 난제품)과 가축용사료에 대한 곰팡이독소들의 오염정도를 측정한 분석 자료들이 충분히 이용 가능하다면 나라별 또는 지역별로 곰팡이독소들의 오염상태를 단순 비교를 통해 그것들에 대한 노출경로를 미리 차단함으로써 food chain에 곰팡이독소들이 유입되는 것을 미리 효과적으로 막을 수 있겠으나, 이들에 대한 제한된 분석 및 보고 자료들로 인해 실제로 각 국가 또는 지역에서 생산된 축산식품들의 오염현황을 현실적 또는 과학적으로 단순비교하기는 매우 어렵다. 본 장에서는 최근 지난 10년간 축산식품에서 검출된 곰팡이독소들의 분석 자료들을 중심으로 제품의 형태별로 표 2에 정리하였다.

표 1. 세계 주요국의 축산식품과 동물사료 내 곰팡이독소(mycotoxins)에 대한 최대 허용 기준량

곰팡이독소 (Mycotoxins)	독소생성 곰팡이 (Mycotoxin-producing fungi)	축산식품 및 동물사료 (Animal-derived foods and feeds)	최대허용기준 (Maximum levels)			
			미국	유럽연합	한국	일본
아플라톡신[1] (Aflatoxins) B1, B2, G1, G2 (단위: ppb)	*Aspergillus flavus* *A. parasiticus* *A. nominus* *A. pseudotamarii*	• 우유를 제외한 모든 식품 (B1+B2+G1+G2)	20	4-15	15	10[2]
		• 전지우유, 저지방우유, 탈지유 (B1/M1)	-/0.5	-/0.05	10/0.5	-
		• 유아용/성장기용 조제분유/우유 (M1)	-	0.025	0.025	-
		• 치즈 (M1) (EU)	-	0.25	-	-
		• 모든 가축용 사료 원료 (EU)	-	20	-	-
		• 보조 및 배합사료 (EU)	-	10	-	-
		예외) 유용(dairy) 반추가축 및 어린염소, 돼지, 가금류용 혼합사료	-	5	-	-
		예외) 송아지 및 어린양용 배합사료	-	10	-	-
		예외) 유용(dairy) 반추가축 및 어린염소, 돼지, 가금류를 제외한 육우, 양, 염소, 돼지 및 가금류용 혼합사료	-	20	-	-
		• 아래의 예외를 제외한 모든 가축 (반추동물 포함)용 사료제품 (원료포함) (미국)	20	-	-	-
		예외) 미성숙 가축 (가금류 포함) 및 반추 가축용 옥수수와 견과류 제품	20	-	-	-
		예외) 육우, 돼지 및 가금류용 면실박사료 (나이와 육종에 관계없음)	300	-	-	-
		예외) 육우, 돼지, 또는 성숙한 가금류용 옥수수와 견과류 제품	100	-	-	-
		예외) 100 파운드 이상의 출하전 돼지용 옥수수와 견과류 제품	200	-	-	-
		예외) 출하전 육우용 옥수수와 견과류 제품	300	-	-	-
		• 양축용 (번식용 · 비육용 어린송아지, 젖소용, 포유자돈, 이유돈, 산란용 · 육용종계 어린병아리, 육계전기, 육용오리전기, 종오리용 어린 오리에 한함), 대용유용, 반추동물용섬유질 (번식용 · 비육용어린송아지, 젖소용에 한함), 기타 어린동물 이용 배합사료 (한국)	-	-	10	-
		• 프리믹스용 제외 기타 배합사료 (한국)	-	-	20	-
		• 단미사료 - 식물성 (조류 · 섬유질류 일부 유지류 · 전분류 · 과실류 · 채소류 · 버섯류 제외), 혼합성 (식물이 혼합된 것에 한함), 남은 음식물사료 (한국)	-	-	50	-
		• 분유떼기 송아지/돼지, 초생추, 젖소용 배합사료 (일본)	-	-	-	10
		• 그 외 배합사료 (일본)	-	-	-	20
데옥시니발레놀 (Deoxynivalenol) (단위: ppm)	*Fusarium graminearum* *F. culmorum*	• 옥수수 부산물을 제외한 곡류 및 곡류제품용 원료 (EU)	-	8	-	-
		• 옥수수 부산물 (EU)	-	12	-	-
		• 돼지 및 4개월령 이하의 송아지 및 어린양과 염소를 제외한 보조 또는 배합사료 (EU)	-	5	-	-
		• 양돈용 보조 · 배합사료 (EU)	-	0.9	-	-
		• 4개월령 이하 송아지, 어린양, 염소용 보조 및 배합사료 (EU)	-	2	-	-
		• 목초 사양위주 사육우, 120일령 이상의 사육장 비육우와 닭 (총사료의 50% 이하) 사료용 곡류 및 곡류부산물 (미국)	10	-	-	-
		• 돼지사료용 곡류 및 곡류부산물 (총사료의 20% 이하) (미국)	5	-	-	-
		• 위와 다른 종류의 모든 동물용 곡류 및 곡류부산물 (총사료의 50% 이하) (미국)	5	-	-	-
		• 3개월령 이상의 소 배합사료 (일본)	-	-	-	4
		• 3개월령 이상의 소 외 배합사료 (일본)	-	-	-	1
푸모니신 (Fumonisins) B1, B2, B3 (단위: ppm)	*F. verticillioides* *F. proliferatum* *F. verticillioides*	• 옥수수 및 옥수수제품용 원료 (EU)	-	60	-	-
		• 돼지, 말, 토끼 및 애완용동물용 보조 및 배합사료 (EU)	-	5	-	-
		• 양어용 보조 및 배합사료 (EU)	-	10	-	-
		• 가금류, 4개월령 이하의 송아지 및 어린양과 염소 (EU)	-	20	-	-
		• 4개월령 이상의 반추동물 및 여우 (EU)	-	50	-	-
		• 말과 토끼용 옥수수 및 옥수수 부산물 (미국)	5	-	-	-
		• 돼지와 메기용 옥수수 및 옥수수 부산물 (미국)	20	-	-	-
		• 번식용 반추동물, 가금류 (젖소와 산란계 포함)용 옥수수 및 옥수수 부산물 (미국)	30	-	-	-
		• 육우목적 90일령 이상의 반추동물용 옥수수/그 부산물 (미국)	60	-	-	-
		• 육계용 가금류용 옥수수/그 부산물 (미국)	100	-	-	-
		• 위와 다른 모든 종류의 가축사료 (미국)	10	-	-	-
Zearalenone (단위: ppm)	*F. culmorum* *F. graminearum*	• 옥수수 부산물을 제외한 곡류 및 곡류제품용 원료 (EU)	-	2	-	-
		• 옥수수 부산물	-	3	-	-
		• 자돈(piglets) 및 미성숙 암돼지(gilts)용 보조 또는 배합사료	-	0.1	-	-
		• 암돼지 및 육성돈	-	0.25	-	-
		• 육성우, 젖소 및 모든 양과 염소	-	0.5	-	-
Ochratoxin A (단위: ppm)	*A. ochraceus* *Penicillium viridicatum* *A. cyclopium*	• 곡류 및 곡류제품용 원료 (EU)	-	0.25	-	-
		• 양돈용 보조 및 배합사료 (EU)	-	0.05	-	-
		• 가금류용 보조 및 배합사료 (EU)	-	0.1	-	-
		• 프리믹스용 제외 기타 배합사료 (한국)	-	-	0.2	-
		• 단미사료 - 식물성 (조류 · 섬유질류 일부 유지류 · 전분류 · 과실류 · 채소류 · 버섯류 제외), 혼합성 (식물이 혼합된 것에 한함), 남은 음식물사료 (한국)	-	-	0.25	-

[1] 아플라톡신에 있어서 유제품을 제외한 사료 내 허용기준은 총아플라톡신(B1+B2+G1+G2)을 기준으로 함.
[2] 일본의 경우 유제품에 대한 별도 기준없이 모든 식품에 총아플라톡신 양을 기준으로 설정

표 2. 세계 각국별 유제품 및 육제품 내 곰팡이 독소의 오염수준

제품종류	샘플수 (양성샘플수)	곰팡이독소	평균값 (최대값)	분석방법	국가/지역	참고문헌
우유 (retail milk)	242 (178)	아플라톡신 M1	0.1 (0.352)	HPLC	중국	Xiong et al., 2018
우유 (retail milk)	12	아플라톡신 M1	Unknown (0.012)	ELISA	말레이시아	Nadira et al., 2017
원유 (raw milk from general dairy farm)	96	아플라톡신 M1	0.023 (unknown)	HPLC	한국	Kim and Nam, 2016
원유 (raw milk from HACCP controlled farm)	96	아플라톡신 M1	0.017 (unknown)	HPLC	한국	Kim and Nam, 2016
우유 (retail milk)	20	아플라톡신 M1	0.058 (0.099)	HPLC	나이지리아	Anthony et al., 2016
원유 (raw milk)	107	아플라톡신 M1	0.151 (0.845)	HPLC	파키스탄	Iqbal et al., 2013
원유 (raw milk)	28	아플라톡신 M1	0.025 (unknown)	HPLC	한국	Park et al., 2012
우유 (retail milk)	100	아플라톡신 M1	0.030 (unknown)	HPLC	한국	Park et al., 2012
원유 (raw milk in Winter)	45	아플라톡신 M1	0.144 (1.321)	HPLC	남아프라카공화국	Dutton et al., 2012
원유 (raw milk in Summer)	45	아플라톡신 M1	0.162 (1.544)	HPLC	남아프라카공화국	Dutton et al., 2012
우유 (retail milk in Winter)	23	아플라톡신 M1	0.278 (3.072)	HPLC	남아프라카공화국	Dutton et al., 2012
우유 (retail milk in Summer)	22	아플라톡신 M1	0.022 (0.112)	HPLC	남아프라카공화국	Dutton et al., 2012
우유 (pasteurized milk)	91	아플라톡신 M1	0.052 (0.250)	HPLC	이란	Fallah, 2010
우유 (retail milk)	72	아플라톡신 M1	0.009 (unknown)	ELISA	스페인	Cano-Sancho et al., 2010
우유 (retail milk)	125	아플라톡신 M1	0.031 (0.200)	HPLC	브라질	Shundo et al., 2009
원유 (raw milk in Jan.)	101	아플라톡신 M1	0.011 (unknown)	HPLC	일본	Sugiyama et al., 2008
원유 (raw milk in Feb.)	97	아플라톡신 M1	0.007 (unknown)	HPLC	일본	Sugiyama et al., 2008
원유 (raw milk in Jun.)	101	아플라톡신 M1	0.005 (unknown)	HPLC	일본	Sugiyama et al., 2008
치즈 (cheese)	2	아플라톡신 M1	Unknown (0.022)	ELISA	말레이시아	Nadira et al., 2017
치즈 (cheese)	20	아플라톡신 M1	0.588 (1.530)	HPLC	나이지리아	Anthony et al., 2016
치즈 (white cheese)	119	아플라톡신 M1	0.148 (0.595)	HPLC	파키스탄	Iqbal et al., 2013
치즈 (white cheese)	72	아플라톡신 M1	0.297 (1.200)	HPLC	이란	Fallah, 2010
크림치즈 (cheese cream)	150	아플라톡신 M1	0.103 (0.456)	HPLC	파키스탄	Iqbal et al., 2013
요구르트 (yogurt)	5	아플라톡신 M1	Unknown (0.025)	ELISA	말레이시아	Nadira et al., 2017
요구르트 (yogurt)	96	아플라톡신 M1	0.090 (0.616)	HPLC	파키스탄	Iqbal et al., 2013
요구르트 (yogurt)	72	아플라톡신 M1	0.013 (unknown)	ELISA	스페인	Cano-Sancho et al., 2010
요구르트 (yogurt)	68	아플라톡신 M1	032 (0.119)	HPLC	이란	Fallah, 2010
버터 (butter)	74	아플라톡신 M1	0.070 (0.413)	HPLC	파키스탄	Iqbal et al., 2013
버터 (butter)	31	아플라톡신 M1	0.005 (0.026)	HPLC	이란	Fallah, 2010
조제분유 (modified milk powder)	142	아플라톡신 M1	0.003 (0.008)	HPLC	한국	Kang et al., 2013
성장기용 조제분유 (modified milk powder for follow-up)	68	아플라톡신 M1	0.003 (0.01)	HPLC	한국	Kang et al., 2013
분유 (powdered milk)	11	아플라톡신 M1	Unknown (0.086)	ELISA	말레이시아	Nadira et al., 2017
아이스크림 (ice cream)	36	아플라톡신 M1	0.041 (0.132)	HPLC	이란	Fallah, 2010
닭 (chicken)	115	총아플라톡신	2.40 (8.01)	HPLC	파키스탄	Iqbal et al., 2014
닭 (chicken)	115	아플라톡신 B1	1.63 (7.86)	HPLC	파키스탄	Iqbal et al., 2014
닭 (chicken)	115	오크라톡신	1.41 (4.70)	HPLC	파키스탄	Iqbal et al., 2014
닭 (chicken)	115	제랄레논	2.01 (5.10)	HPLC	파키스탄	Iqbal et al., 2014
쇠고기 (Beef in Winter)	10	총아플라톡신	4.84 (8.32)	HPLC	요르단	Herzallah, 2009
쇠고기 (Beef in Summer)	10	총아플라톡신	3.77 (8.20)	HPLC	요르단	Herzallah, 2009
달걀 (egg)	80	총아플라톡신	1.97 (4.46)	HPLC	파키스탄	Iqbal et al., 2014
달걀 (egg)	80	아플라톡신 B1	1.39 (3.19)	HPLC	파키스탄	Iqbal et al., 2014
달걀 (egg)	80	오크라톡신	1.17 (2.98)	HPLC	파키스탄	Iqbal et al., 2014
달걀 (egg)	80	제랄레놀	1.58 (3.60)	HPLC	파키스탄	Iqbal et al., 2014
달걀 (egg in Summer)	20	총아플라톡신	1.77 (5.15)	HPLC	요르단	Herzallah, 2009
쏘세지 (sausages)	100	오크라톡신	4.5-8 (18)	ELISA	이탈리아	Lacumin et al., 2009
햄 (dry-cured Iberian ham)	45	오크라톡신	Unknown (6.3)	HPLC	스페인	Rodriguez et al., 2015
햄 (parma retail product)	22	오크라톡신	Unknown (158)	LC-MS/MS	덴마크	Sørensen et al., 2010

* 각각의 곰팡이독소에 대한 단위는 표1을 기준으로 함.

축산식품 중에서는 유제품에 대한 자료들이 가장 많았으며, 표에서 보여주는 것 처럼 대부분의 유제품 내 아플라톡신에 대한 오염수준은 각국에서 설정하고 있는 한계허용량에는 미치지는 않았으나 몇몇 국가에서 생산된 일부 유제품 및 육제품 내 아플라톡신에 대한 오염수준은 그들이 기준으로 설정한 한계치 이상이었다(표 2). 그러나, 식육제품에 대한 곰팡이독소들 관련 연구자료는 유제품에 비해서는 상당히 제한되어 있음을 알 수 있었다. 그러나, 식육 및 육제품 내 곰팡이독소 중에는 아플라톡신과 오크라톡신의 오염이 심한 것을 알 수 있었다(Montanha et al., 2018).

가축용 사료 내 곰팡이독소 오염현황

가축사료용 곡류 및 작물은 품종의 종류와 수확된 사료들의 수분함량에 따라 곰팡이독소들의 양의 차이가 생길 수 있다. 일반적으로 조사료는 곡물사료에 비해 수분함량이 높으며 수확시기에 따라서도 많은 차이를 보일 수 있다. 그래서, EU는 가축용 사료 내 곰팡이독소의 분석 시 시료를 12%의 수분함량 기준으로 최대허용량을 설정하고 있다. 가축용 사료 내 곰팡이독소의 오염과 관련해서 Biomin사로부터 최근에 발표된 자료(Biomin World Mycotoxin Survey 2018)를 중심으로 세계 각 지역, 사료형태, 독소별 오염현황을 소개했다 (그림1). 이번 조사를 위해서 2018년 한 해 동안 그들은 79개국에서 18,424개의 시료를 가지고 다양한 종류의 곰팡이독소들에 대한 오염정도를 위해 81,936번의 분석을 하였다. 그들은 각각의 독소에 대한 위험권장수준을 세계 각국에서 설정하고 있는 최대허용기준보다 낮은 농도인 총아플라톡신– 2 ppb, 제랄레논– 50 ppb, 데옥시니발레놀– 150 ppb, T-2– 50 ppb, 푸모니신– 500 ppb, 오크라톡신– 10 ppb로 동물의 생산성 또는 질병과 관련하여 자체적으로 기준을 설정하였다. 이번 조사에 의하면, 시료당 한 종류의 곰팡이독소만이 위험권장량수준 이상으로 검출된 비율은 20%, 하나 이상의 곰팡이독소들의 검출률은 70%나 차지하였으며, 위험권장수준 이하의 비율은 단지 10% 였다.

그림 1에서 보는 바와 같이, 전체적으로 아시아 및 아프리카지역에서 생산된 옥수수를 포함한 곡류 및 완제품사료로부터 곰팡이독소 오염률이 다른 지역보다 높음을 알 수 있었다. 특히, 아시아지역에서는 중국과 대만에서 곰팡이독소의 오염정도가 매우 심하게 나타났다고 보고되었다. 그 외 아프리카지역에서도 곰팡이독소들에 대해서 오염률이 상당히 높음을 알 수 있다. 그러나, 북아메리카(미국과 캐나다)에서의 곰팡이독소의 검출률은 다른 지역에 비해서 상대적으로 매우 낮게 나타났다. 완제품사료, 옥수수 또는 옥수수를 제외한 곡류(밀, 보리, 귀리, 쌀, 수수, 기장) 사료에 있어서 곰팡이독소들에 대한 특별한 형태별 차이는 없어 보였다. 하지만, EU지역에서 생산된 사료에서는 T-2에 대한 오염률이 상당히 높았으며 완제품사료 및 옥수수에서는 오크라톡신의 위험권장수준 이상의 검출 비율이 다른지역에 비해서 상대적으로 높게 보였다. 중남미아메리카에서는 곡류에서 아플라톡신의 오염률이 다른 지역에서보다 월등히 높게 나타났으며 아프리카지역에서는 곡류에서 제랄레논과 푸모니신에 대한 검출률이 높았다. 그림 2에서는 사료에서 곰팡이독소의 최대오염량을 EU의 곡물 및 배합사료에 대한 최대허용량을 기준으로 한계선을 그려 놓았다. 그림에서 보이는 것처럼, 전체 아메리카지역에 있어서는 옥수수에 함유된 푸모니신이 EU의 한계치를 넘었으며 옥수수를 포함한 곡류사료들에 있어서 특히, 데옥시니발레놀의 오염수준이 EU의 최대허용기준 이상으로 오염의 심각함을 보여주고 있다. 이외 아플라톡신(아프리카 제외)은 완제품사료와 옥수수에서, 제랄레논은 옥수수에서 최대오염량이 지역별로 큰 차이 없이 매우 높은 수준으로 검출되었다. 그 외 조사료나 보조사료에 대한 곰팡이 오염은 표 3에서 보여주고 있다. 특히, 중국, 호주, 남아프리카공화국등에서 생산된 사료작물(조사료, 싸일리지)과 완제품, 그리고 곡류부산물(땅콩깻묵, 면실, 면실박)에서 EU의 기준보다 더 높은 곰팡이독소들이 검출되었다. 결론적으로, 현재 주요 사료 작물, 곡물 및 그들의 완제품이 다양한 곰팡이독소에 오염되어 있으며 이와 같은 사실은 가축의 생산성과 생산품에 대한 잠재적인 위험요소임을 보여주고 있다.

표 3. 세계 각국/지역별 가축용 사료 내 곰팡이 독소의 오염수준 (단위: μg/kg, ppb)

제품종류	샘플수 (양성샘플수)	곰팡이독소	평균값 (최대값)	분석방법	국가	참고문헌
완제품 사료 (finished feed)	9,682	푸모니신	914 (77,502)	HPLC/ELISA	중국	Streit et al., 2013
완제품 사료 (finished feed)	6,053	오크라톡신	4 (1,589)	HPLC/ELISA	중국	Streit et al., 2013
사료 (feed in Winter)	20	총아플라톡신	9.92 (30.67)	HPLC	요르단	Herzallah, 2009
사료 (feed in Summer)	20	총아플라톡신	5.32 (28.73)	HPLC	요르단	Herzallah, 2009
옥수수 (maize)	41 (16)	아플라톡신 B1	33.0 (372.0)[1]	HPLC	중국	Xiong et al., 2018
옥수수 (corn)	10,172	총아플라톡신	16 (6,105)	HPLC/ELISA	베트남	Streit et al., 2013
밀 (wheat)	15,549	데옥시니발레놀	535 (50,289)	HPLC/ELISA	중앙유럽	Streit et al., 2013
곡류 (grains)	49	아플라톡신 B1	9 (17)	Unknown	호주	Moore et al., 2008
곡류 (grains)	45	데옥시니발레놀	961 (3,000)	Unknown	호주	Moore et al., 2008
곡류 (grains)	45	제랄레논	147 (258)	Unknown	호주	Moore et al., 2008
조사료 (forages)	33	아플라톡신 B1	10 (16)	Unknown	호주	Moore et al., 2008
조사료 (forages)	33	제랄레논	1,058 (5,811)	Unknown	호주	Moore et al., 2008
조사료 (forages)	33	데옥시니발레놀	477 (1,758)	Unknown	호주	Moore et al., 2008
싸일리지 (silage)	3	데옥시니발레놀	396 (761)[1]	Unknown	네덜란드	Santos & Fink-Gremmels, 2014
싸일리지 (silage)	13,578	제랄레논	101 (26,728)	HPLC/ELISA	호주	Streit et al., 2013
싸일리지 (silage)	11	아플라톡신B1	78.9 (422.0)	HPLC	남아프리카공화국	Dutton et al., 2012
짚 (straw)	56	아플라톡신 B1	9 (11)	Unknown	호주	Moore et al., 2008
짚 (straw)	56	제랄레논	556 (3,551)	Unknown	호주	Moore et al., 2008
짚 (straw)	56	데옥시니발레놀	461 (1,860)	Unknown	호주	Moore et al., 2008
면실박 (cottonseed meal)	32 (13)	아플라톡신 B1	2.9 (11.4)[1]	HPLC	중국	Xiong et al., 2018
면실 (cotton seed)	4	아플라톡신 B1	9.8 (17.2)	HPLC	남아프리카공화국	Dutton et al., 2012
소맥피 (wheat bran)	30 (3)	아플라톡신 B1	9.8 (11.4)[1]	HPLC	중국	Xiong et al., 2018
땅콩깻묵 (peanut cake)	37 (19)	아플라톡신 B1	47.9 (317.5)[1]	HPLC	중국	Xiong et al., 2018
대두박 (soybean meal)	34 (10)	아플라톡신 B1	1.7 (5.9)[1]	HPLC	중국	Xiong et al., 2018

[1] 평균값은 전체 샘플수에 대한 평균값이 아닌 30 ppb 이상의 AFB1 샘플수의 평균값임.

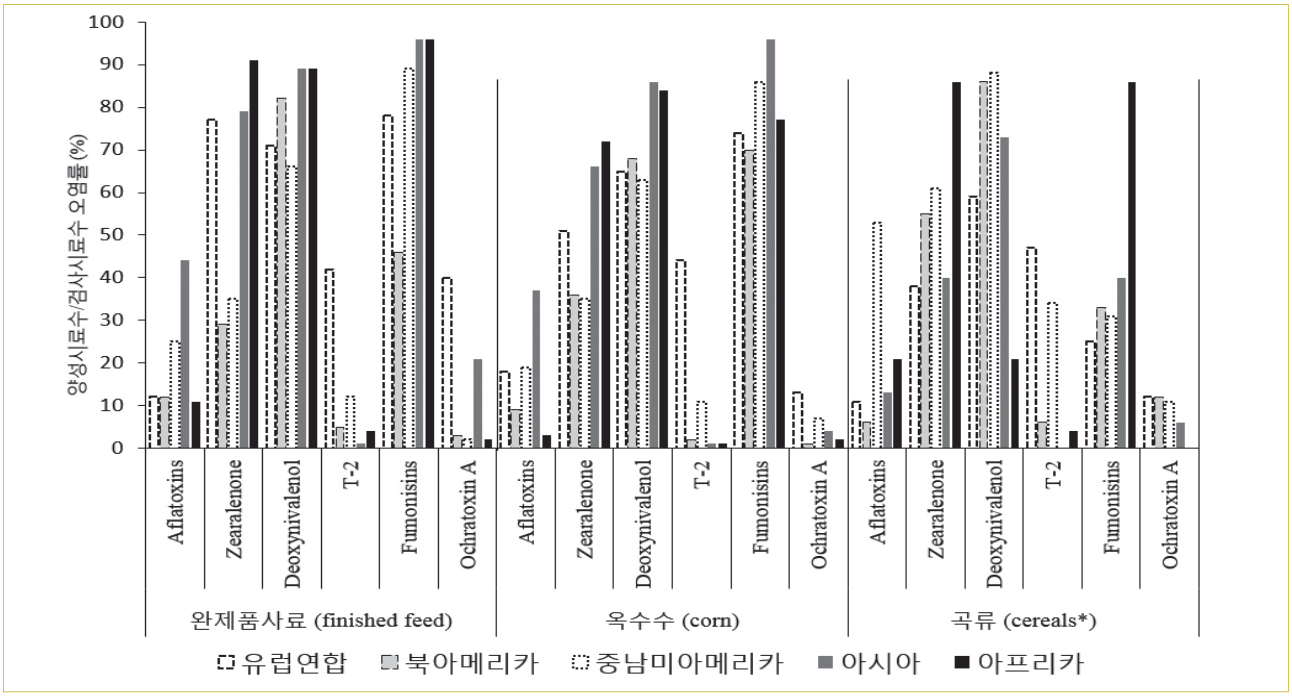

그림 1. 지역, 사료형태, 독소별 곰팡이독소 오염현황.
* 곡류는 밀, 보리, 귀리, 쌀, 수수, 기장을 포함함. 농도단위는 표 1을 기준으로 하였음.

(자료출처: Biomin World Mycotoxin Survey 2018, https://www.biomin.net/en/biomin-mycotoxin-survey/)

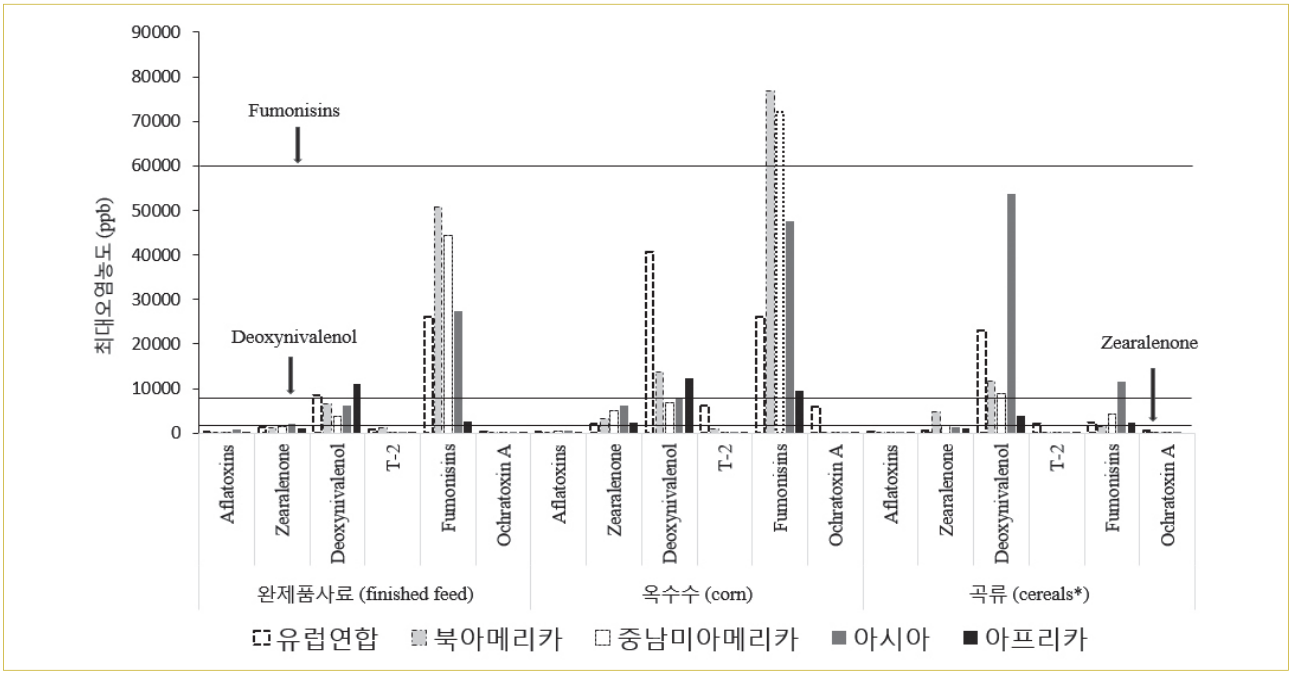

그림 2. 곰팡이독소의 최대오염량 (maximum levels).
* 그림 내 3개의 선들은 EU에서 허용하는 독소당 사료 내 최대허용량을 나타냄. 농도단위는 표 1을 기준으로 하였음.

(자료출처: Biomin World Mycotoxin Survey 2018, https://www.biomin.net/en/biomin-mycotoxin-survey/)

결론

축산식품산업은 농업을 통한 우리의 먹거리 중에서도 생산, 소비 그리고 경제적 측면에 있어서 식품산업 분야에서 차지하는 비율이 가장 높으며, 또한 농작물 분야에서도 가축사료용 곡물이나 작물의 규모도 무시할 수 없는 수준이다. 축산분야에 있어서 우리는 지난 수십 년간 고름 우유, 광우병, 조류인플루엔자, 구제역 및 최근 급식사고 등과 같은 축산식품의 안전성과 관련된 문제가 생산자, 소비자, 관련산업 종사자 및 국가에 크나큰 피해와 부담을 발생시킨다는 것을 깨닫는 데 너무나 큰 비용을 지불하여 왔다. 본문에서 설명된 바와 같이, 지금까지 유제품 내 아플라톡신에 대한 오염수준은 대부분의 나라에서 설정하고 있는 최대허용량 수준에는 미치지 못하나, 최근의 몇몇 국가에서 생산된 유제품 및 육제품 내 아플라톡신의 오염수준은 그 심각성이 실로 가볍지 않음을 보여준다. 또한, 축산물의 안전성과 직접적으로 관련 있는 가축용 사료의 안전성 문제는 이전에 충분히 겪어 왔던 식품안전성과 국민의 건강 및 관련산업의 피해 등에 대한 학습효과를 통해 이제는 경각심을 가져야 할 때라고 생각된다. 곰팡이독소에 오염된 식품용 곡류 및 견과류의 섭취는 사람과 동물의 건강에 직접 영향을 줄 수 있다. 이와는 달리, 축산식품은 곰팡이독소들에 오염된 식품 또는 사료나 남은 음식물 사료 등이 가축에게 급여되면 가축의 체내 대사작용이나 다양한 장내 미생물들에 의해 곰팡이독소들의 양이 상당히 감소하거나 약화한 독소 형태로 전환되고 축산물로 전이된다는 것이다. 끝으로 이 글을 통한 핵심 주제는 곰팡이독소들이 축산물을 통해 food chain으로 유입되는 것을 줄이기 위한 체계적인 접근 방법이 반드시 필요하며, 특히 오염된 사료를 가축에게 급여하는 위험성에 대한 심각성을 먼저 고려할 필요가 있다는 것이다.

참고 문헌

1. Cheli, F., D. Battaglia, R. Gallo, and V. Dell'Orto. 2014. EU legislation on cereal safety: An update with a focus on mycotoxins. Food Control 37:315-325.
2. Darwish, W. S., Y. Ikenaka, S. M. M. Nakayama, and M. Ishizuka. 2014. An Overview on Mycotoxin Contamination of Foods in Africa. J Vet Med Sci 76(6):789-797.
3. Dutton, M. F., M. Mwanza, S. de Kock, and L. D. Khilosia. 2012. Mycotoxins in South African foods: a case study on aflatoxin M1 in milk. Mycotoxin Res 28(1):17-23.
4. European Commission. 2006. Commission recommendation of 17 August 2006 on the presence of deoxynivalenol, zearalenone, ochratoxin A, T-2 and HT-2 and fumonosins in products intended for animal feedin, 2006/576/EU. In: official journal, L 229, pp 7-9.
5. European Commission. 2011. Commission regulation of 16 June 2011. Amending Annex I to directive 2002/32/EC of the European Parliament and of the Council as regards maximum levels for nitrite, melamine, ambrosia ssp. and carry-over certain coccidiostats and histomonostats and consolidating Annexes I and II thereto, 574/2011/EU. In: official journal, L 159, pp 7-24.
6. Fallah, A. A. 2010. Assessment of aflatoxin M1 contamination in pasteurized and UHT milk marketed in central part of Iran. Food Chem Toxicol 48(3):988-991.
7. Herzallah, S. M. 2009. Determination of aflatoxins in eggs, milk, meat and meat products using HPLC fluorescent and UV detectors. Food Chem 114(3):1141-1146.
8. Iacumin, L., L. Chiesa, D. Boscolo, M. Manzano, C. Cantoni, S. Orlic, and G. Comi. 2009. Moulds and ochratoxin A on surfaces of artisanal and industrial dry sausages. Food Microbiol 26(1):65-70.
9. Iqbal, S., M. Asi, and A. Arino. 2013. Assessment of aflatoxin M1 in milk and milk products from Punjab, Pakistan. J Vet Pharmacol Ther 35:85-85.
10. Iqbal, S. Z., S. Nisar, M. R. Asi, and S. Jinap. 2014. Natural incidence of aflatoxins, ochratoxin A and zearalenone in chicken meat and eggs. Food Control 43:98-103.
11. Kang, Y., J. Song, J. Seo, S. Park, and M. Kim. 2013.

Analysis and risk assessment of aflatoxin M1 in infant formula. Korean J Food Sci 45(2):235-240.

12. Kim, K. and M. Nam. 2016. Decrease of aflatoxin M1 level in raw cow's milk using the hazard analysis and critical control points (HACCP) system. J Life Sci 26(2):190-197.

13. Montanha, F. P., A. Anater, J. F. Burchard, F. B. Luciano, G. Meca, L. Manyes, and C. T. Pimpao. 2018. Mycotoxins in dry-cured meats: A review. Food Chem Toxicol 111:494-502.

14. Murphy, P. A., S. Hendrich, C. Landgren, and C. M. Bryant. 2006. Food mycotoxins: An update. J Food Sci 71(5):R51-R65.

15. Nadira, A. F., J. Rosita, M. E. Norhaizan, and S. M. Redzwan. 2017. Screening of aflatoxin M-1 occurrence in selected milk and dairy products in Terengganu, Malaysia. Food Control 73:209-214.

16. National Grain and Feed Association. 2011. FDA Regulatory Guidance for Mycotoxins: A Guide for Grain Elevators, Feed Manufacturers, Grain Processors and Exporters. Available at https://www.ngfa.org/wp-content/uploads/NGFAComplianceGuide-FDARegulatoryGuidanceforMycotoxins8-2011.pdf.

17. Park, S., Y. Kang, K. Kwon, K. Lee, and M. Kim. 2012. Analysis and monitoring of aflatoxin M1 in milk. Korean J Food Sci 44(2):247-250.

18. Pulina, G., G. Battacone, G. Brambilla, F. Cheli, P. P. Danieli, F. Masoero, A. Pietri, and B. Ronchi. 2014. An update on the safety of foods of animal origin and feeds. Ital J Anim Sci 13(4).

19. Rushing, B. R. and M. I. Selim. 2019. Aflatoxin B1: A review on metabolism, toxicity, occurrence in food, occupational exposure, and detoxification methods. Food Chem Toxicol 124:81-100.

20. Streit, E., G. Schatzmayr, P. Tassis, E. Tzika, D. Marin, I. Taranu, C. Tabuc, A. Nicolau, I. Aprodu, O. Puel, and I. P. Oswald. 2012. Current Situation of mycotoxin contamination and co-occurrence in animal feed-focus on Europe. Toxins 4(10):788-809.

21. US FDA. 2019. Guidance for industry: Action levels for poisonous or deleterious substances in human food and animal feed. Available at https://www.fda.gov/food/guidanceregulation/ucm077969.htm

22. Xiong, J. L., L. L. Xiong, H. L. Zhou, Y. L. Liu, and L. Y. Wu. 2018. Occurrence of aflatoxin B1 in dairy cow feedstuff and aflatoxin M1 in UHT and pasteurized milk in central China. Food Control 92:386-390.

23. Anthony, M. H., et al., 2016. Aflatoxin M1 in breat milk, cow milk, and milk products in Minna, Nigeria and their predisposing factors.Biochem Anal Biochem 5:4.

24. Cano-Sancho, G., S. Martin, A. J. Ramos, J. Peris-Vicene, and V. Sanchis. 2010. Occurrence of aflatoxin M1 and exposure assessmentin Catalonia (Spain). Revista Iberoamericana de Micologia, 27(3):130-135.

25. Iqbal, S. Z., S. Jinap, A. A. Pirouz, and A. R. Faizal. 2015. Aflatoxin M1 in milk and dairy products, occurrence and recent challenges:A review. Trends in Food Sci & Tech 46:110-119.

26. Iacumin L, L. Chiesa, D. Boscolo, M. Manzano, C. Cantoni, S. Orlic, and G. Comi. 2009. Moulds and ochratoxin A on surfaces of artisanaland industrial dry sausages. Food Microbiology 26 :65-70

27. Moore, D. D., L. Chin, and W. L. Bryden. 2008. Contamination of Australian animal feedstuffs and forages with mycotoxins. Proc Aust Soc Anim Prod.27:35

28. Rodríguez, A., V. Bernáldez, M. Rodríguez, M. J. Andrade, F. Núñez, and J. J. Córdoba. 2015. Effectof selected protective cultures on ochratoxin A accumulation in drycured Iberian ham during its ripening process. Food Sci. Technol-LEB 60, 923 - 928.

29. Santos, R.R. and J. Fink-Gremmels, Mycotoxin syndrome in dairy cattle: Characterisation and intervention results. World Mycotoxin J. 2014, 7, 357 - 366.

30. Shundo, L., S. A. Navas, L. C. A. Lamardo, V. Ruvieri, and M. Sabino. 2009. Estimate of aflatoxin M1 exposure in milk and occurrencein Brazil. Food Control 20:655-657.

31. Sørensen, L.M., J. Mogensen, and K. F. Nielsen. 2010. Simultaneous determination of ochratoxin A, mycophenolic acid and fumonisinB2 in meat products. Anal Bioanal.Chem. 398, 1535 - 1542.

32. Sugiyama, K., H. Hiraoka, and Y. Sugita-Konishi. 2008. Aflatoxin M1contamination in raw bulk milk and the presence of aflatoxin B1in corn supplied to dairy cattle in Japan J the Hyg Soc of Japan. 49(5):352-355.