유럽에서 기후변화 시나리오에 따른 곰팡이독소 아플라톡신 B_1의 위험도 예측

이슬[1], 박기환[2], 전향숙[1]*

Seul Lee[1], Ki-Hwan Park[2], Hyang Sook Chun[1]*

[1]한국식품연구원, [2]중앙대학교

[1]Korea Food Research Institute, [2]Chung-Ang University

서론

기후는 언제나 변한다. 그래서 기후변화라는 용어는 통상적으로 받아들여지기도 한다. 그러나 지금의 기후변화는 보편적인 기후변화의 폭을 넘어서고 있다. 기후 변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change)의 제 4차 보고서에 따르면 지난 100년(1906~2005년)간 지구 평균 기온이 0.74℃ 상승하였고, 21세기에는 예측된 모델에 따라 약 2~5℃ 상승할 것이라고 한다. 또한 대부분의 육지에서 폭염과 호우의 발생빈도가 증가할 것으로 나타났다. 이러한 기후 변화의 영향은 식품 및 사료의 안전성에 위협을 가하는 요인으로 작용할 것으로 인식되고 있다(FAO 2008).

식품의 안전성을 위협하는 위해인자 가운데 곰팡이독소는 현재까지 약 300여종이 알려져 있으며, 세계 식량 작물의 25%에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이 가운데 간을 비롯한 여러 장기에 이상을 유발하고 면역기능 억제 및 발암성을 나타내는 아플라톡신은 약 20여종이 알려져 있으며, 그 중 B_1, B_2, G_1, G_2가 대표적이다. 아플라톡신 중에서는 B_1(2,3,6a,9a-tetrahydro-4-methoxycyclopenta[c]furo[3′,2′:4,5]furo[2,3-h][l] benzopyran-1,11-dione)이 가장 흔히 발견되고 가장 강력한 독성을 나타낸다. 아플라톡신을 생성하는 대표적인 곰팡이는 *Aspergillus flavus, A. parasiticus*로 전 세계 토양에 흔히 분포되어 있는 곰팡이다. 이 곰팡이는 온대지방에서는 잘 서식하지 않고 주로 고온 다습한 열대나 아열대 지방에 널리 분포하며, 쌀, 밀, 옥수수 등의 곡류, 견과류, 향신료 등을 기질로 하여 수분 16% 이상, 상대습도 80~85% 이상, 온도 25~30℃에서 독소를 잘 생성하는 것으로 알려져 있다(Pitt and Hocking, 2009).

기후 변화로 인해 온대 기후에 속한 유럽 일부 국가 및 미국 등에서 곰팡이독소의 발생이 증가될 것이라는 예측이 나오고 있다(Paterson 등, 2010). 온대 지역의 기후는 더욱 온화해져 아플라톡신 생산의 최적 기온과 유사한 30℃에 이를 것이다. 기후변화는 현재 재배되고 있는 작물에 영향을 미치고, 새로운 생태 조건이 형성되어 아플라톡신에 민감한 것으

*Corresponding Author: Hyang Sook Chun,
Food Safety Research Division, Korea Food Research Institute,
Sungnam-si, Gyeonggi-do, 463-746, Korea
Tel: +82-31-780-9273, Fax: +82-31-709-9876, E-mail:hschun@kfri.re.kr

로 알려진 작물들(옥수수, 땅콩 등)의 오염 가능성은 더욱 커질 수 있다. 따라서 현재는 아플라톡신이 작물에 특별한 문제를 일으키지 않는 상황이더라도 앞으로 이들 독소가 심각한 위험 요소로 작용할 수 있다.

유럽의 경우, 아플라톡신 B_1의 오염 수준은 수입된 옥수수, 밀, 쌀 등에서 높은 것으로 보고되고 있다. 유럽 내 유통되거나 제3국으로부터 수입한 식품에 대해 위해요소를 발견하고 정보공개에 의해 안전조치를 취하는 위해식품신속경보체제(RASFF)의 데이터에서도 2009년에 조치가 취해진 669건 가운데 638건이 아플라톡신과 직·간접적으로 관련된 것이었다. 특히 유럽에서는 기후변화로 인해 유럽의 일부 국가들의 기온이 온대에서 열대나 아열대 기후로 바뀔 것으로 예측되어 아플라톡신 B_1의 위험이 증가될 것을 우려하고 있다. 이에 대응하기 위해 유럽식품안전청(EFSA)의 Emerging Risks Unit은 식품과 사료 분야의 새로운 위험을 식별하기 위해 기후변화가 우려되는 지역의 옥수수, 밀, 쌀에서 곰팡이독소 생산의 패턴 변화를 조사하고, 기후변화 시나리오에 따른 아플라톡신 B_1의 위험도를 예측하였다.

본고에서는 국내 기후변화 가상 시나리오를 통해 아플라톡신의 위해 가능성을 예측하고 이에 대한 대책을 마련하는데 도움이 되고자 유럽의 기후변화 시나리오에 따른 아플라톡신 B_1의 위험도 예측 결과를 살펴보았다.

본론

1. 기후변화 시나리오

기후변화 시나리오는 발생 가능한 가상의 미래 시나리오를 만들고 전 지구 기후 모델(Global Climate Model, GCM)을 이용하여 각 시나리오에 따른 기후의 변화를 시뮬레이션하는 방법이다. 미래의 기후변화를 예측하는 데는 8개의 모델(CCSR/NIES : Center for Climate System Research and National Institute for Environmental Studies, CCCma : Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis, CSIRO : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization Queensland Australia, Hadley Centre : Hadley centre Climate Model, GFDL : Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, MPIM : Max Planck Institute for Meteorology, NCAR PCM : National Center for Atmospheric Research Parallel Climate Model, NCAR CSM : National Center for Atmospheric Research Climate Systems Model)이 사용되었다. 기후변화를 예측한 모델들의 2100년도 예측치를 살펴보면 2~5℃ 사이로 평균 온도가 상승할 것으로 보고되고 있다(Fig. 1). 이를 토대로 아플라톡신 B_1의 위험도를 예측하기 위해 유럽에서 사용된 기후변화 시나리오는 +2℃와 +5℃이었다.

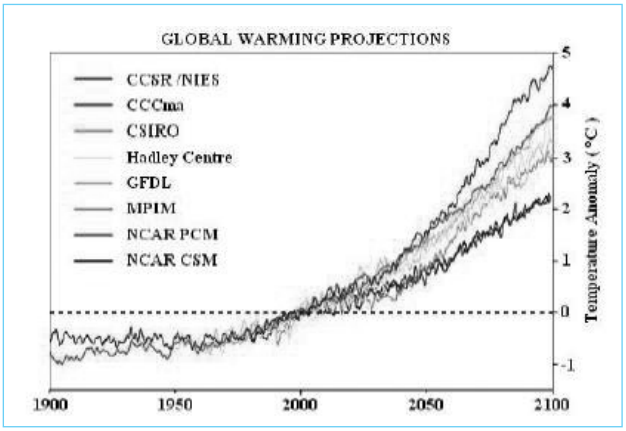

Fig. 1. IPCC graphic of uncertainty rages with various models over time (GNU, on line)

2. 유럽에서 옥수수, 밀, 쌀의 재배 면적

유럽에서 밀은 가장 중요한 곡물로 총 재배 면적은 25,615,600 헥타르이다. 비교적 재배를 많이 하는 국가는 프랑스(5,146,600 헥타르), 독일(3,226,000 헥타르), 폴란드(2,346,200 헥타르), 루마니아(2,148,800 헥타르), 이탈리아(1,795,500 헥타르), 스페인(1,772,500 헥타르)의 순이다. 옥수수 또한 유럽에서는 중요한 곡물의 하나로 총 재배 면적은 8,362,800 헥타르이다. 비교적 재배를 많이 하는 국가는 루마니아(2,338,900 헥타르), 프랑스

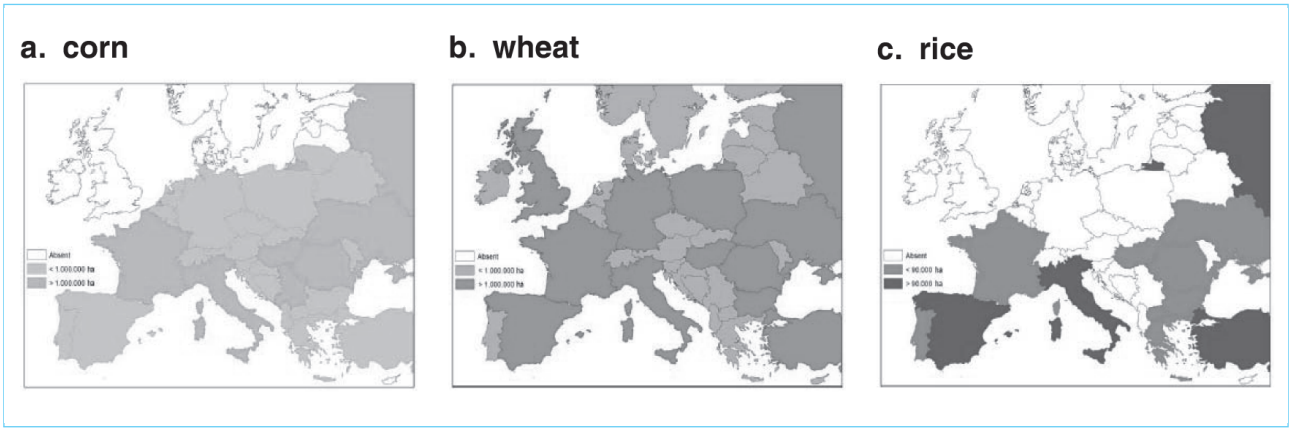

Fig. 2. European distribution of maize (a), wheat (b) and rice (c).

(1,679,800 헥타르), 헝가리(1,177,300 헥타르)와 이탈리아(915,500 헥타르)의 순이다. 쌀은 총 재배 면적이 약 450,000 헥타르로, 밀과 옥수수에 비해 적다. 이탈리아(238,000 헥타르), 스페인(119,000 헥타르), 포르투갈(28,000 헥타르), 그리스(29,000 헥타르), 프랑스(29,000 헥타르), 루마니아(24,300 헥타르), 유고슬라비아 공화국(13,300 헥타르), 헝가리(3,100 헥타르) 등이 비교적 재배면적이 넓은 국가이다(Fig. 2).

3. 유럽의 아플라톡신 B_1 오염현황

유럽에서 옥수수와 밀의 아플라톡신 오염 정도를 조사한 결과는 Table 1과 같다. 먼저 이탈리아에서 분석한 자료를 살펴보면 옥수수의 최고 오염수준은 233㎍/kg 이었다. 2003년도에도 높은 아플라톡신B_1 오염도(최고 수준 155㎍/kg)를 보였는데 이는 2003년에 극심한 폭염으로 옥수수 전 체 재배 기간인 5월에서 9월 사이 온도가 높았기 때문이다. 터키는 아플라톡신을 생산하는 곰팡이가 성장할 수 있는 최적의 기후 조건을 지녔다. 터키에서 분석한 자료를 살펴보면 옥수수의 최고 오염수준은 2006년에 432㎍/kg 이었다. 루마니아에서 분석한 옥수수의 최고 오염수준은 46.4㎍/kg, 밀의 최고 오염수준은 6.4㎍/kg로 옥수수보다 오염수준이 낮았다. 유럽은 주로 옥수수 중 아플라톡신 오염이 문제가 되고 있다. 반면 밀 중 아플라톡신 오염은 대부분의 유럽 국가에선 주된 관심사가 아니지만, 루마니아의 경우 큰 문제로 인식되고 있다. 쌀의 경우도 마찬가지로 유럽 대륙에서 아플라톡신 오염을 분석한 자료는 많지 않다. Hussaini 등(2007)은 곰팡이독소 생산에 유리한 기후인 나이지리아의 Niger 주에서 쌀을 분석했다. Niger 주는 연평균기온이 31.7℃, 평균 습도가 51.6%, 5월~10월 사이는 평균기온이 29.5℃, 평균 습도가 73.1%로 곰팡이독소 생성에 더 적합한 기후 조건이다. 28개의 샘플을 분석한 결과 아플라톡신B_1의 최고 오염수준은 464㎍/kg 이었고, 평균농도는 35.89㎍/kg 이었다.

4. 아플라톡신 생성 곰팡이의 생태학적 특징

대부분의 *Aspergillus*속 곰팡이는 위도 26°과 36° 사이에서 가장 많이 발생하나 위도 45° 이상에서는 거의 발생하지 않는다(Klich, 2007). *A. flavus*가 성장하는데 적합한 온도는 최소 10~12.8℃고 최대 43~48.8℃이며 적정 수준은 33.8℃ 근처이다. 성장을 위한 적절한 수분활성도의 예를 보면 25.8℃에서 0.82, 30.8℃에서 0.81, 37.8℃에서 0.80 정도이다(Pitt and Hocking, 2009).

아플라톡신을 생성하는 대표적인 곰팡이인 *A. flavus*의 라이프 사이클은 토양 중 농작물 잔류물에서의 콜로니형성과 작물에의 감염 단계로 나눌 수 있다(Fig. 3). 곰팡이의 주 월동체인 균핵과 분생자는 작물의 성장 초기에 적당한 환경이 되면 균사로 발아하여 분생자병과 수많은 분생자를 공중에 분산시킨다. 이 때 *A. spp.* 포자의 분산은 상대 습도에 영향을 받지 않고 바람 속도에 영향을 받는다. 이 후 곤충이나

Table 1. Results of surveys for aflatoxin B_1 showing concentrations and distribution of contamination in maize and wheat in Europe

나라/지역	연도	작물	샘플 수	LOQ+(㎍/kg)	n>LOQ	평균값(㎍/kg)	최소값/최대값(㎍/kg)	출처
루마니아 동남부	2002/2004	옥수수	54	5	20	6.86	0/46.4	(Tabuc 등, 2009)
루마니아	2005	옥수수	11	0.83	3		0/3.92	(Braicu 등, 2008)
루마니아	1997	옥수수	30	4*	0	-	-	(Curtui 등, 1998)
이탈리아	2002(이탈리아 북부)	옥수수	98	0.05*	자료없음	-		(Battilani 등, 2008b)
	2003(이탈리아 북부)	옥수수	98			4.60	<0.05/155	
	2004(에밀리아로마냐)	옥수수	84			16.6	<0.05/233	
	2004(에밀리아로마냐)	옥수수	69			10.6	<0.05/233	
	2005(에밀리아로마냐)	옥수수	237			2.3	<0.05/90	
	2006(에밀리아로마냐)	옥수수	48			20	<0.05/233	
이탈리아	2004	옥수수	84	0.05*	자료없음	21	자료없음	(Battilani 등, 2008a)
	2005	옥수수	81			14	자료없음	
	2006	옥수수	39			14	자료없음	
	2007	옥수수	51			15	자료없음	
발레다오스타주(이탈리아)	2004	옥수수	28	5	1		>20	(Decastelli 등, 2005)
이탈리아	2003	옥수수	110	0.05*	82	4.4	자료없음/154.5	(Piva 등, 2006)
이탈리아 북부	1999	옥수수	323	자료없음	자료없음		0/<50	(Verderio 등, 2005)
	2000	옥수수	360		자료없음		0/<50	
	2003	옥수수	441		자료없음		0/>50	
	2004	옥수수	344		자료없음		0/>50	
이탈리아	2002	옥수수	7	0.1	자료없음	0.81	자료없음	(Cinti 등, 2005)
	2003	옥수수	1		자료없음	35.2	-	
이탈리아(로디)	2002	옥수수	10	0.05*	3	0.3	0/1.75	(Pietri 등, 2004a)
이탈리아 북부	1995	옥수수	98	0.05*	자료없음	1.9	<0.05/109	(Pietri 등, 2004b)
	1996	옥수수	104		자료없음	0.3	<0.05/13	
	1997	옥수수	94		자료없음	1.5	<0.05/32	
	1998	옥수수	114		자료없음	1.5	<0.05/28	
	1999	옥수수	93		자료없음	4.10	<0.05/158	
이탈리아(산록지대)	2000	옥수수	160	자료없음	0	-	-	(Reyneri 등, 2003)
	2001	옥수수	160		10	자료없음	>0.2	
	2002	옥수수	150		3	자료없음	>0.2	
이탈리아(산록지대, 롬바르디아, 베네토주)	1982/1984	옥수수	111	자료없음	39	자료없음	0.10/1.02	(Micco 등, 1986)
스위스	1987	추수시 옥수수	33	0.2*	0	-	-	(Steiner 등, 1991)
	1987/1988	저장된 옥수수	22	0.2*	2	1.8	자료없음/3.2	
스위스	1999	옥수수	48	0.1*	10	0.7	0.1/1.5	(Noser 등, 2001)
	2000	옥수수	51		5	0.4	0.2/0.9	
터키	1986	옥수수	58	자료없음	27		0/73.9	(Ozay 와Heperkan, 1989)
터키	2002/2003	옥수수	19	1*	자료없음	10.94a	0.01/32.30a	(Oruc 등, 2006)

나라/지역	연도	작물	샘플 수	LOQ+(㎍/kg)	n>LOQ	평균값(㎍/kg)	최소값/최대값(㎍/kg)	출처
터키(부르사 지역)	2006	옥수수	5	1*	자료없음	133	자료없음/431.90	(Oruc 등, 2007)
터키(카라만마라슈)	2005/2006	옥수수	28	0.2*	21	14.90(중앙값=2.1)	불검출/108.86	(Alptekin 등, 2009)
터키(추쿠로바)		옥수수	73	자료없음	17	자료없음	0.7/50a	(Gursoy 와Bicici, 2003)
터키(코니아)	2002	옥수수	26	1.5*	15	자료없음	<1.5/133	(Nizamlyodlu 와Oguz, 2003)
터키		옥수수	167	자료없음	46%	자료없음	3/70	(Alperden 등, 1990)
터키	2005	옥수수	47	1.75*	22	자료없음	<1.75/120.33a	(Giray 등, 2009)
프랑스	1998/1999 영국에 수입된 옥수수		97	0.2	자료없음	자료없음	<0.1/5.8	(Scudamore 와Patel, 200
크로아티아	1978/1979	옥수수	자료없음	자료없음	4	자료없음	5/50	(Pepeljnjak 와Balzer, 1982)
사이프러스	1997	옥수수	55	0.1*	0	-	-	(Ioannou-Kakouri 등, 2004)
	1998	옥수수	65	0.1*	0	-	-	
	1999/2003	옥수수	52	0.2*	0	-	-	
체코 공화국	2008	옥수수	8	자료없음	0	-	-	(Monbaliu 등, 2010)
스페인	2008	옥수수	14	자료없음	0	-	-	(Monbaliu 등, 2010)
포르투갈	2008	옥수수	12	자료없음	0	-	-	(Monbaliu 등, 2010)
스페인(갈리시아)	1983	갓 딴 옥수수	55	자료없음	0	-	-	(Munoz 등, 1990)
루마니아	2002/2004	밀	35	5	자료없음	1.83	0/6.4	(Tabuc 등, 2009)
루마니아	2005	밀	26	0.83	9		0/5.7	(Braicu 등, 2008)
루마니아	1997	밀	25	4*	0	-	-	(Curtui 등, 1998)
루마니아(트란실바니아)	2005	밀	20	자료없음	3		0/6	(Morar 등, 2007)
사이프러스	1997	밀	27	0.1*	0	-	-	(Ioannou-Kakouri 등, 2004)
	1998	밀	3	0.1*	0	-	-	
	1999/2003	밀	30	0.2*	0	-	-	
터키	2002/2003	밀	41	0.1*	17	자료없음	<0.01/0.14	(Giray 등, 2007)
터키(추쿠로바)		밀	43	자료없음	7	자료없음	0.18/3.5a	(Gursoy 와Bicici, 2003)
이탈리아(시칠리아주)	2005	밀	165	0.5*		1.0	자료없음/1.7	(Gallo 등, 2008)
	2006		203	0.5*		1.2	자료없음/2.7	
체코 공화국	2008	밀	8	자료없음	0	-	-	(Monbaliu 등, 2010)
덴마크	2008	밀	14	자료없음	0	-	-	(Monbaliu 등, 2010)
헝가리	2008	밀	7	자료없음	0	-	-	(Monbaliu 등, 2010)
알제리	2004(미티자 지역)	밀	3	0.005*	2	-	-/3.41	(Riba 등, 2010)
	2006(미티자지역)	밀	13		8	-	-/13.45	
	2004(세티프 지역)	밀	2		1	-	0.87	
	2006(세티프지역)	밀	10		6	-	-/7.0	

(+): LOQ, limit of quantification (this information is not always available; some studies report the limit of detection)
(*): LOD: limit of detection
(a): total aflatoxins
Grey lines: studies with georeferenced data

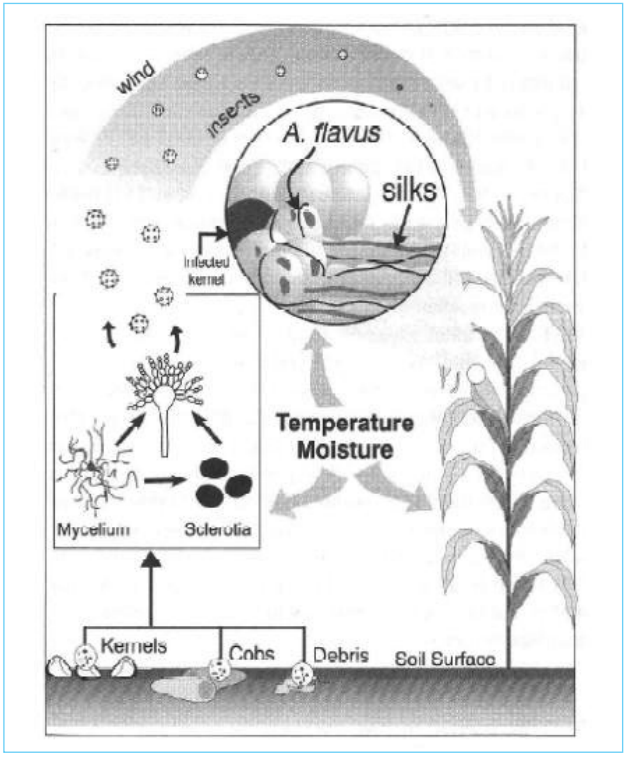

Fig. 3. Schematic diagram showing the infection of *A.flavus* in maize.

바람에 의해 옮겨져 작물에서 콜로니를 형성함으로써 감염된다. 이러한 감염 사이클은 옥수수, 목화씨, 땅콩, 견과류와 같은 다양한 식품 원료 작물에서 관찰된다(Horn, 2005; Northolt, 1979; Payne, 1998; Scheidegger and Payne, 2005). 일반적으로 환경요인 이외에 감염에 영향을 주는 요소로는 필드에 있는 포자의 양, 농작물의 민감성(종, 건강 상태 등), 경작 시스템, 곤충개체군 등이다(Northolt, 1979). 곤충에 의한 피해는 작물의 수분함량에 따라 차이가 있으며 곰팡이가 성장하는 동안 곰팡이독소 수준에 영향을 미친다(Dawd 등, 2005). 곤충에 의한 피해 이외에도 수확 시기는 식품원료 작물 중 아플라톡신 수준에 영향을 미치는데 수확 시기가 지연되면 아플라톡신 수준이 올라간다. 특히 식품원료 작물의 수확 전이나 수확 시 폭우로 인해 수확시기가 지연되면 영향이 최고에 달한다(Cotty and Jaime-Garcia, 2007).

옥수수의 경우, *A. favus*는 수확 전에 감염될 수 있으며, 건조 및 저장 단계에서 관리가 소홀할 때 아플라톡신의 오염이 증가될 수 있다. 보통 옥수수는 14%의 함수율로 사일로에 저장된다. 이 때 저장된 옥수수에 곰팡이성장과 곰팡이독소 생산에 영향을 미치는 주요 비생물학적 요인은 수분활성도, 온도, 가스 조성 등이다. 옥수수를 CA 저장할 때, 25% CO_2처리는 *A. flavus* 성장을 감소키지만 아플라톡신 합성을 저해하기 위해서는 적어도 50% CO_2처리가 요구되기 때문에 현재 기후변화에서 예측되는 수 %의 CO_2 변화는 *A. flavus* 생장과 아플라톡신 생산에 거의 영향을 미치지 않을 것으로 보고 있다. 밀에서의 *A. favus* 감염 경로나 숙주와의 상호작용은 잘 알려지지 않았으나 옥수수와 유사할 것으로 추측되고 있다. 그러나 밀은 옥수수에 비해 낱알의 크기가 작기 때문에 상대적으로 곰팡이독소 형성에 덜 민감하나 높은 수분 함량과 온도 조건에 저장하게 되면 아플라톡신을 생성할 수 있다(Smith and Moss, 1985). 쌀 또한 옥수수와 마찬가지로 개화시기에 곰팡이가 오염되어 등숙기에 오염이 증가하는 것으로 추정된다. 쌀은 일반적으로 수확 후 건조를 실시하게 되는데, 보건조건이 부적절할 경우 아플라톡신 생성 곰팡이에게는 쌀이 이상적인 기질이 된다. 그러나 필드에서 *Aspergillus* 감염과 영향을 미치는 인자에 대한 정보는 거의 없어 밀과 마찬가지로 옥수수와 유사하다고 보고 개화기에 곰팡이에 감염되는 것이 매우 결정적이고 추수할 때까지의 기상조건이 아플라톡신 생성에 많은 영향을 미칠 것이라고 추정하고 있다.

식품원료 작물에서 *A. flavus*의 성장과 아플라톡신 생성에 영향을 미치는 인자로는 작물에 감염되는 접종원, 포자 등 접종원의 분산 정도, 포자의 발아, 감염, 곰팡이의 성장, 아플라톡신의 생산, 토양 및 윤작, 경작 시스템, 품종, 파종, 관개(irrigation), 시비, 잡초 및 해충 제어, *A.* section *Flavi* 제어 등이다. 이러한 영향인자들의 상호작용에 대해 연구된 결과를 종합하여 비교적 정보가 축적되어 있는 옥수수에서 관계도로 나타낸 것은 Fig. 4와 같다. 이를 기초로 하여 유럽에서는 식품원료 작물, 기후, 곰팡이 발생 및 독소 생성에 대한 서브모델을 만든 다음 이들 모델을 일관성 있게 연결함으로써 기후변화 시나리오가 아플라톡신 발생에 미치는 영

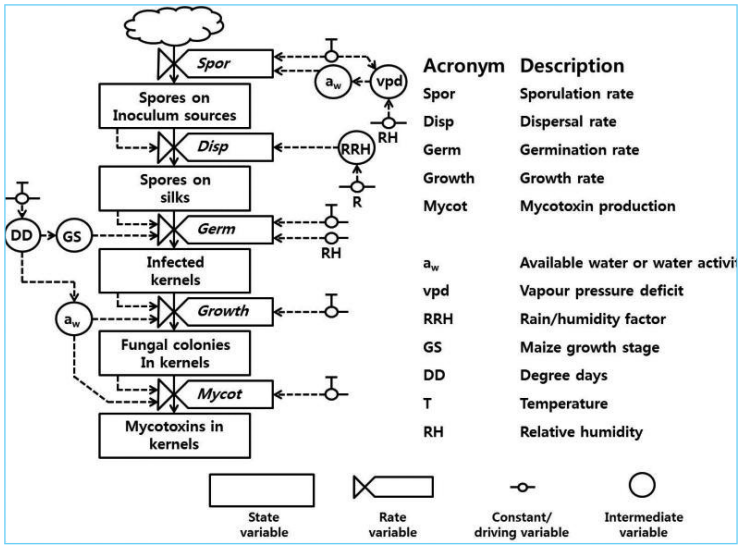

Fig. 4. Relational diagram of the predictive model for Aspergillus flavus growth and aflatoxin production in maize.

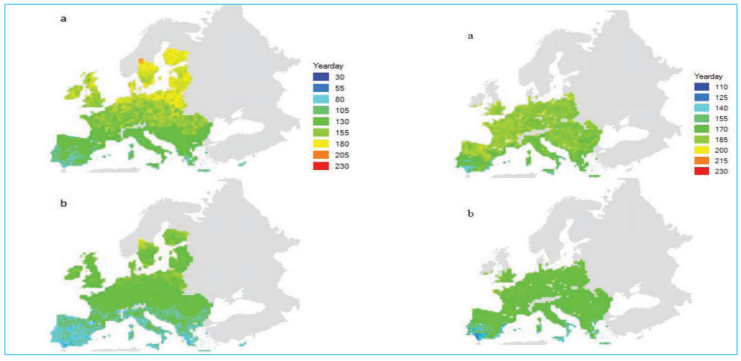

Fig. 5. Flowering date (ordinal date) of wheat (left panel) and maize (right panel) in 2050 in the reference (a) and +5 (b) scenarios

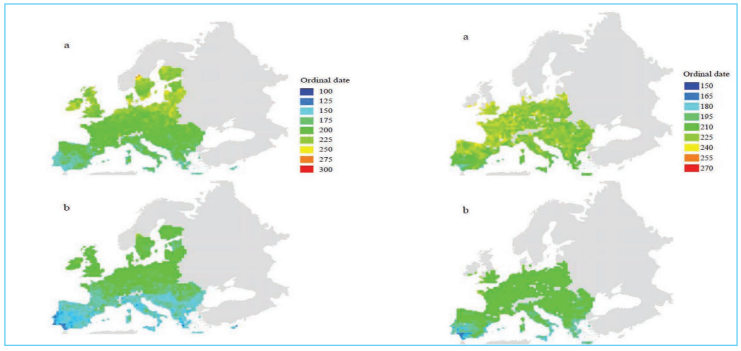

Fig. 6. Harvest date (ordinal date) of wheat (left panel) and maize (right panel) in 2050 in the reference (a) and +5 (b) scenarios

향을 모델링하였다.

4. 기후변화 시나리오에 따른 작물 phenology

옥수수, 밀, 쌀 등의 식품원료 작물에서 공통적으로 개화기에 곰팡이 감염과 추수할 때까지의 기상조건이 아플라톡신 생성에 많은 영향을 미칠 것이라고 보고 있다. 이에 +2℃ 및 +5℃ 기후 시나리오에 따라 옥수수와 밀의 개화시기와 수확시기를 예측하고 이를 맵핑한 결과는 Fig. 5 및 6과 같다. 그 결과, 전반적으로 세 가지 작물의 개화 시기와 수확 시기가 당겨져 옥수수와 쌀의 재배 지역이 북상할 것으로 예측되었다. 식품원료 작물별로 살펴보면, 유럽에서 재배되는 옥수수의 개화기는 현재 기후에서 185일, +2℃ 시나리오에서는 180일, +5℃ 시나리오에서는 175일로 더 빨라졌다. 옥수수 수확기는 현재 220일, +5℃ 시나리오에서 20일 빨라졌다. 밀의 개화 시기는 현재 기후에서 150~180일, +2℃ 시나리오에서 142~174일, +5℃ 시나리오에서 125~150일로 더 빨라졌다. 반면, 현재 기후에서의 밀의 수확 시기는 +2℃ 시나리오와 큰 차이를 보이지 않았으나 +5℃ 시나리오에서는 200일 이전으로 훨씬 더 빨라졌다. 쌀의 개화시기는 현재 기후에서 223일, +2℃ 시나리오에서는 217일, +5℃ 시나리오에서는 211일로 빨라졌다. 한편 쌀의 수확 시기는 현재 기후에서 263일, +5℃ 시나리오에서는 27일 빨라질 것으로 예측되었으나 데이터의 부족으로 맵은 작성되지 않았다.

5. 기후변화 시나리오에 따른 유럽의 아플라톡신 위험 지수(risk index)의 맵핑

유럽에서 재배되는 옥수수, 밀, 쌀에 대해 *A. flavus*에 대한 예측 모델이 제작되었다. 모든 기상데이터는 2011~2100년의 현행, +2℃와 +5℃ 시나리오가 입력되었다. 그 결과는 다섯 단계에 따라 제작되고 시각화된 맵으로 보고되었다. 즉, (1) *A.*

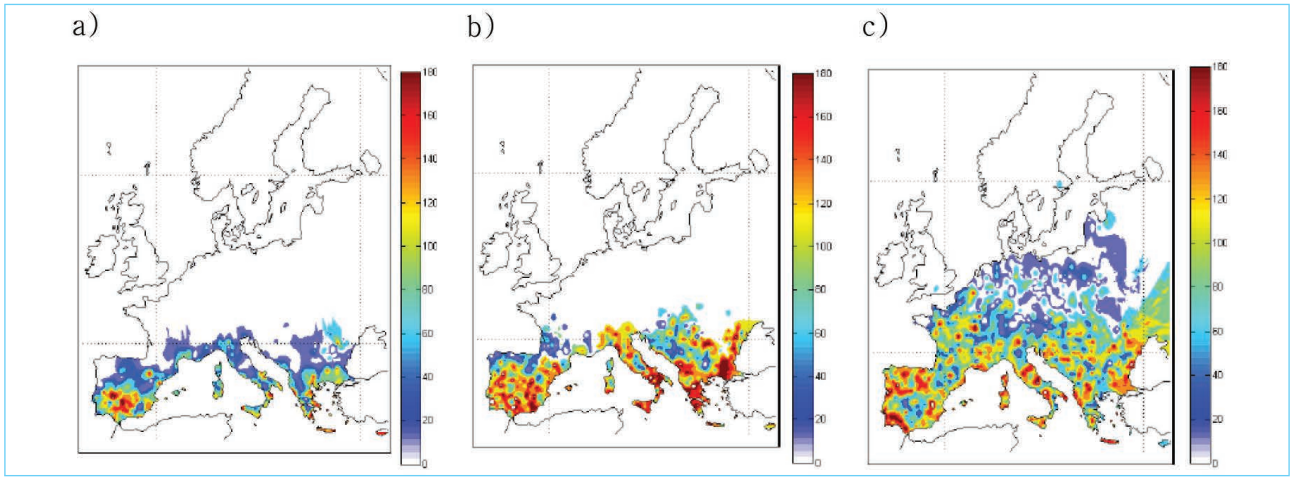

Fig. 7. Map reporting the risk for aflatoxin B_1 contamination in maize in the actual meteorological scenario(a), the +2℃ climate change scenario(b) and the +5℃ climate change scenario(c). The year 2079 is the mean meteorological condition in the period 2000-2100.

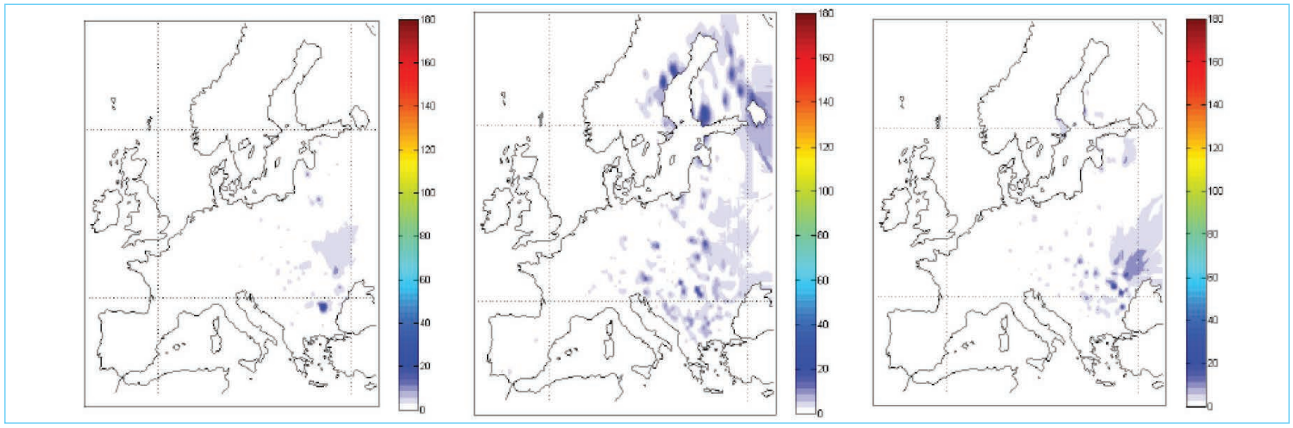

Fig. 8. Map reporting the risk for aflatoxin B_1 contamination in wheat in the actual meteorological scenario(a), the +2℃ climate change scenario(b) and the +5℃ climate change scenario(c). The year 2050 is the mean meteorological condition in the period 2000-2100.

flavus 예측 모델의 출력 데이터와 격자 정보를 포함한 아플라톡신 위험 지수는 ASCⅡ 형식으로 제작, (2) 데이터베이스화 된 semi-variogram을 도출하기 위해 variogram을 계산한 다음 모델 기반 semi-variogram/correlogram 산출, (3) 특정 격자 점(50×50㎞ 격자)에서 계산된 원 데이터는 Kriging법을 사용하여 내삽 및 외삽, (4) 맵 작성 및 geospatial 데이터 분석을 수행하는 데 유용한 소프트웨어인 맵핑 도구상자(Matlab)를 데이터 시각화 및 맵핑을 위해 사용, (5) 모든 지도는 맵핑 도구상자(Matlab)에서 제공하는 해안선과 육지 지역을 기반으로 했고, 동일 아플라톡신 위험 지수에 해당하는 경우는 동일 색상으로 Mercator 투영법을 기반으로 제작되었다. 그 결과, 아플라톡신 지수가 141~180(지도에서 적색 부분부터 흑적색 부분)은 아플라톡신 B_1 고 위험을, 아플라톡신 지수가 101~140(지도에서 황색 부분부터 주황색 부분)은 아플라톡신 B_1 중 위험을, 아플라톡신 수치가 41~100(지도에서 초록색 부분부터 연한 파란색 부분)은 아플라톡신 B_1 의 저 위험을, 아플라톡신 수치가 40 이하(지도에서 파란색 부분부터 보라색 부분)는 무시할 수 있는 정도의 아플라톡신 위험을 나타낸다. 옥수수에서 *A. flavus* 예측 모델의 결과 얻어진 아플라톡신 지수를 2016, 2018, 2020, 2079, 2087, 2088년 기상 데이터에 맵핑한 다음, 2079년 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그 결과,

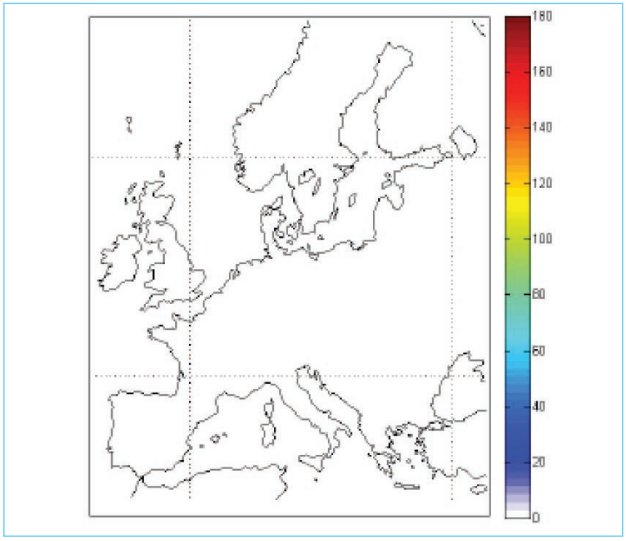

Fig. 9. Map reporting the risk for aflatoxin B_1 contamination in rice in all the climate change scenarios and years considered.

옥수수에서 아플라톡신 오염에 대한 위험 지수는 주로 +2℃의 시나리오에서 증가할 것으로 예측되었다. 이 시나리오에서 아플라톡신 위험 이 분명하게 증가되는 곳은 스페인의 중앙과 남부, 터키를 포함한 이탈리아의 남부와 발칸 반도와 같이 전형적인 유럽의 농업 지역이었다.

밀의 아플라톡신 위험 지수 또한 2016, 2020, 2021, 2050, 2072, 2082년 데이터로 맵핑한 다음, 2050년 결과를 Fig. 8에 대표적으로 나타내었다. 현 기후 시나리오에서는 일부 루마니아, 폴란드, 헝가리, 슬로바키아 지역에서 제로보다 약간 높은 위험 지수가 관찰되었다. +2℃ 기후변화 시나리오의 경우, 위험 지수는 비슷했지만 지역이 다소 넓어졌다. +5℃ 기후변화 시나리오에서는 아플라톡신 오염에 대한 위험이 북상하는 지역이 관찰되었지만 위험 지수는 모두 40 이하로 낮았다.

쌀의 아플라톡신 위험 지수를 2016, 2020, 2058, 2070, 2085, 2099년 데이터에 대해 맵핑한 결과 세 가지 기후 시나리오에서 아플라톡신 위험 지수는 제로이거나 계산되지 않았다(Fig. 9).

수행된 시뮬레이션의 정확도를 살펴보기 위해 민감도 분석을 실시한 결과, 모델은 주로 온도 증가에 따라 변화에 높은 민감도를 보여주었다. 복잡한 함수가 예측 모델의 최종 출력값에 영향을 주기 때문에 위험도는 선형으로 나타나지 않았으나, 온도가 증가할 때 곰팡이의 성장과 아플라톡신의 생성 및 아플라톡신 위험 지수가 증가하였다.

6. EU에서의 아플라톡신 위험도 맵핑에 따른 지역 구분

유럽에서는 세 가지 기후변화 시나리오에 따라 밀, 옥수수 및 쌀에서 아플라톡신 생산 정도와 관련 위험 지수의 맵핑 결과에 따라 다음과 같이 위험지역을 구분하였다.

(i) 아플라톡신 고 위험 지역: 현재 주요 옥수수 작물 생산 지역이 아닌 북유럽 국가(즉, 스페인의 중부와 남부, 이탈리아의 중부와 남부, 그리스, 포르투갈의 북부와 남동부, 불가리아, 알바니아, 사이프러스)

(ii) 아플라톡신 중·저 위험 지역: 4개의 주요 옥수수 생산 국가(즉, 루마니아, 프랑스, 헝가리, 이탈리아의 북동부, 현재 EU-27 총생산의 73%를 차지)

(iii) 아플라톡신 저 위험 지역: 현재 기후 조건으로 아플라톡신 위험에 대해 안전지역에 있는 북유럽 국가

(iv) 아플라톡신 초 저위험 지역: 밀과 쌀에 대해서는 유럽의 모든 지역

결론

한반도는 지난 100년간 평균기온이 1.5℃ 상승했고 지구 온난화로 인해 기후변화가 예상되는 지역이다. 기상청 자료에 의하면 한반도는 21세기 말(2071~2100년)에 평년(1971~2000)대비 기온은 4℃ 상승하고 강수량은 17%가 증가할 것으로 예측되었다. 우리나라의 기후변화 속도는 전 지구의 기후변화 속도보다도 빠르다는 점에서 우려스럽다. IPCC A1B 시나리오 기준으로 볼 때 한반도도 점차 아열대 기후로 변화한다고 예측되고 있다. 이는 온도 상승 및 다습한 기후변화로 인해 아플라톡신을 생성하는 곰팡이의 수가 증가할 수 있다는 것을 의미한다. 먹을거리의 약 70%를 수입에 의존하는 국내 실정을 고려할 때 식량/식품 안보의 차원에서 이상기후를 관리하고 대비해야 한다. 옥수수, 밀, 쌀

모두 국내에서 다소비 되고, 특히 쌀은 주식으로 섭취하는 작물로 앞으로 일어날 기후변화에 맞는 안전관리 방향이 필요하다. 유럽의 경우 추수시기의 아플라톡신 B_1의 위험 지수만 예측되었지만 가공단계나 가공 이후 단계에서도 저장 및 유통 조건에 따라 *Aspergillus* 곰팡이가 성장하고 독소를 생산할 가능성이 크다. 뿐만 아니라 쌀의 경우 데이터의 부족으로 신뢰성 있는 예측 결과가 도출되지 않아, 무엇보다도 사용가능한 데이터의 확보가 중요한 것으로 보인다. 따라서 국내에서 아플라톡신을 포함한 곰팡이독소의 발생 위험에 대해 기후변화가 미치는 영향을 예측할 때는 이러한 점을 고려해야 할 것이다. 날씨를 경영에 반영하는 기상경영이 기업의 보편적인 경영형태로 자리를 잡아가듯 식품안전관리에서도 기상과 연계된 식품안전관리시스템의 확보가 필요하다. 이를 위해서는 즉각적인 결과를 내는 연구도 필요하겠지만 장기적인 안목으로 데이터를 확보하고 체계적으로 해석할 수 있는 기초 연구가 지속적으로 이루어져야 하겠다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 식품의약품안전청 용역개발과제의 연구개발비 지원(10162기후식995)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Alperden I, Aran N, Topal S, Eka D, Kara M and Karaali A 1990. Systematic analysis of mycoflora Turkish foodstuffs. NATO-TU Mycotoxins Project. Joint-Final Report of Mycology and System Analysis Subprojects. Gebze-Kocaeli, Turkey.
2. Alptekin Y, Duman AD and Akkaya MR, 2009. Identification of fungal genus and detection of aflatoxin level in second crop corn grain. Journal of Animal and Veterinary Advances, 8, 1777-1779.
3. Battilani P, Barbano C, Bertuzzi T, Marocco A, Pietri A, Scandolara A and Scudellari D, 2008a. Mycotoxins in Emilia-Romagna: encouraging results. Informatore Agrario, 64, 39-41.
4. Battilani P, Barbano C and Piva G, 2008b. Aflatoxin B1 contamination in maize related to the aridity index in North Italy. World Mycotoxin Journal, 1, 449-456.
5. Battilani P, Rossi V, Giorni P, Pietri A, Gualla A, van der Fels-Klerx H.J, Booij C.J.H, Moretti A, Logrieco A, Miglietta F, Toscano P, Miraglia M, De Santis B, Brera C, 2012. Modelling, predicting and mapping the emergence of aflatoxins in cereals in the EU due to climate change. SCIENTIFIC REPORT submitted to EFSA.
6. Braicu C, Puia C, Bodoki E and Socaciu C, 2008. Screening and quatification of aflatoxins and ochratoxin A in different cereals cultivated in Romania using thin-layer chromatography-densitometry. Journal of Food Quality, 31, 108-120.
7. Cinti F, Bortolotti M and Casagrandi M, 2005. Relationship between the aflatoxin content of maize grain and the feeds that contain it. In: 1st National conference. Mycotoxins in agri-food chain. Istituto Superiore di Sanità. Rome, 29-30 November 2004. M Miraglia, C Brera. Rapporti ISTISAN 05/42 – Istituto Superiore di Sanità, 209-210.
8. Cotty PJ and Jaime-Garcia R, 2007. Influences of climate on aflatoxin producing fungi and aflatoxin contamination. International Journal of Food Microbiology, 119, 109-115.
9. Curtui V, Usleber E, Dietrich R, Lepschy J and Martlbauer E, 1998. A survey on the occurrence of mycotoxins in wheat and maize from western Romania. Mycopathologia, 143, 97-103.
10. Decastelli L, Lai J, Gramaglia M, Monaco A, Nachtmann C, Oldano F, Ruffier M, Sezian A and Bandirola C, 2005. Aflatoxin emergency in feedstuffs and in milk: 2004 Valle d' Aosta state. Tecnica Molitoria, 56, 701-707.
11. Dowd PF, Johnson ET and Williams WP, 2005. Strategies for insect management targeted toward mycotoxin management. In: Aflatoxin and food safety. HK Abbas. Taylor & Francis Group, Boca Raton, London and New York, 517-541.
12. FAO : Climate change : Implications for the food safety, 2008.
13. Gallo G, Bianco Ml, Bognanni R and Saimbene G, 2008. Mycotoxins in durum wheat grain: hygienic-health quality of Sicilian production. Journal of Food Science, 73, T42-T47.
14. Gursoy N and Bicici M, 2003. Determination of fungal infections on wheat and maize grains and some of their mycotoxins in Cukurova region. In: I National Mycotoxins Symposium. Instambul, Turkey, 68-74.
15. Giray B, Atasayar S and Sahin G, 2009. Determination of ochratoxin A and total aflatoxin levels in corn samples from Turkey by enzyme-linked immunosorbent assay. Mycotoxin Research, 25, 113-116.
16. Giray B, Girgin G, Engin AB, Aydn S and Sahin G, 2007. Aflatoxin levels in wheat samples consumed in some regions of Turkey. Food Control, 18, 23-29.
17. Horn BW, 2005. Ecology and population biology of alfatoxigenic fungi in soil. In: Aflatoxin and food safety. HK Abbas. Toylor & Francis Group, Boca Raton. London and New York, 95-116.
18. Hussaini AM, Timothy AG, Olufunmilayo HA, Ezekiel AS and Godwin HO, 2007. Fungi and some mycotoxins contaminating rice (Oryza sativa) in Niger State, Nigeria. African Jounal of Biotechnology, 6, 99-108.
19. Ioannou-Kakouri E, Aletrari M, Christou E, Ralli A, Koliou A and Christofidou M, 2004. Occurrence and control of

mycotoxins in foodstuffs in Cyprus. In: An overview on toxigenic fungi and mycotoxins in Europe. A Logrieco, A Visconti. Kluwer Academic, The Netherlands, 51-65.
20. IPCC, Climate change 2007 : Impacts, adaptation and vulnerability, Chapter 8, Human health, The fourth assessment report of the IPCC, 2007
21. Klich MA, 2007. Environmental and developmental factors influencing aflatoxin production by Aspergillus flavus and Aspergillus parasiticus. Mycoscience, 48, 71-80.
22. Micco C, Grossi M, Onori R, Chirico M and Brera C, 1986. Monitoring for aflatoxin B1, ochratoxin A and zearalenone in Italian maize of the 1982, 1983 and 1984 crops. Rivista della Societa Italiana di Scienza dell' Alimentazione, 15, 113-116.
23. Monbaliu S, van Pioucke C, Detavernier C, Doumoultn F, van Velde MDE, Schoeters E, van Dyck S, Averkieva O, van Peteghem C and de Saeger S, 2010. Occurrence of mycotoxins in feed as analysed by a multi-mycotoxin LC-MS/MS method. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58, 66-71.
24. Morar OA, Braicu C, Modoran C and Florian V, 2007. Evaluation of the mycotic and mycotoxic content and bakery features of wheat from Transylvania in the conditions of the year 2005. Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca, Agriculture. 2007. 63/64, 596-601.
25. Munoz L, Cardelle M, Pereiro M and Reiguera R, 1990. Occurrence of corn mycotoxins in Galicia (Northwest Spain). Journal of Agricultural and Food Chemistry, 38, 1004-1006.
26. Nizamlyodlu F and Oguz H, 2003. Occurrence of aflatoxins in layer feed and corn samples in Konya province, Turkey. Food Additives and Contaminants, 20, 654-658.
27. Northolt MD, 1979. The effect of water activity and temperature on the production of some mycotoxins. PhD, Wageningen University, the Netherlands, Wageningen. 491 pp.
28. Noser J, Wenk P, Sutter A, Fankhauser I and Hirschi H, 2001. Fumonisin B1 and B2, moniliformin, beauvericin and zearalenone in maize from the Swiss retail market. Mitteilungen aus Lebensmitteluntersuchung und Hygiene, 92, 90-103.
29. Oruc HH, Cengiz M and Kalkanli O, 2006. Comparison of aflatoxin and fumonisin levels in maize grown in Turkey and imported from the USA. Animal Feed Science and Technology, 128, 337-341.
30. Oruc HH, Cengz M and Uzunoglu I, 2007. Occurrence of aflatoxin B1 and T-2 toxin in feed and raw ingredients used for animal feeding stuffs. Vereriner Fakultesi Dergisi, Uludag Universitesi, 26, 1-5.
31. Ozay G and Heperkan D, 1989. Mould and mycotoxin contamination of stored corn in Turkey. Mycotoxin Research, 5, 81-89.
32. Paterson RRM, Lima N, 2010. How will climate change affect mycotoxins in food?. Food Research International, 43, 1902-1914.
33. Payne GA, 1998. Process of contamination by aflatoxin producing fungi and their impacts on crops. In: Mycotoxins in Agriculture and Food Safety. KK Sinha, D Bhatnagar. Marcel Dekker InC., New York, 279-306.
34. Pepeljnjak S and Balzer I, 1982. A survey of mycological and mycotoxicological research on seeds in the nephrophthic and anephropathic areas of Yugoslavia (Croatia). Symposium on the mycotoxins, Sarajevo, 14 XII 1979, 1982.
35. Pietri A, Bertuzzi T, Moretti G, Stefanelli C and Piva G, 2004a. Study on the mycotoxin contamination of maize destined for animal feed and produced in Lodi province in 2002. Rivista di Suinicoltura, 45, 95-101.
36. Pietri A, Bertuzzi T, Pallaroni L and Piva G, 2004b. Occurrence of mycotoxins and ergosterol in maize harvested over 5 years in northern Italy. Food Additives and Contaminants, 21, 479-487.
37. Pitt JI and Hocking AD, 2009, Fungi and Food spoilage. Editor. Springer, 540pp.
38. Piva G, Battilani P and Pietri A, 2006. Emerging issues in southern Europe: Aflatoxins in Italy. In: The mycotoxin factbook. Food & feed topics. D Barug, D Bhatnagar, HPv Egmond, JWvd Kamp, WAv Osenbruggen, A Visconti. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, 139-153.
39. Reyneri A, Blandino M, Vasara F, Matta A, Lazzari A, Alma A, Lessio F, Ferrero C, Minelli L, Cavallero A, Turletti A and Bersani L, 2003. Impiego di tecniche agronimiche per contenere le micotossine nella granella di mais. Quaderni Regione Piemonte-Agricoltura., 37, 34-37.
40. Riba A, Bouras N, Mokrane S, Mathieu F, Lebrihi A and Sabaou N, 2010. Aspergillus section Flavi and aflatoxins in Algerian wheat and derived products. Food and Chemical Toxicology, 48, 2772-2777.
41. Scheidegger KA and Payne GA, 2005. Unlocking the secrets behind secondary metabolism: a review of Aspergillus flavus from pathogenicity to functional genomics. In: Aflatoxin and food safety. HK Abbas. Taylor & Francis Group, Boca Raton, London and New York, 137-165.
42. Scudamore KA and Patel S, 2000. Survey for aflatoxins, ochratoxin A, zearalenone and fumonisins in maize imported into the United Kingdom. Food Additives and Contaminants, 17, 407-416.
43. Smith JE and Moss MO, 1985. Mycotoxins – Formation, analysis and significance. Editor. John Wiley & Sons, Chicester, Great Britain, 148 pp.
44. Steiner W, Pacciarelli B and Battaglia R, 1991. Aflatoxin B1, BGY-fluorescence and kogic acid in maize kernels: an investigation on maize of Swiss origin. Mitteilungen aus dem Gebiete der Lebensmitteluntersuchung und Hygiene, 82, 457-474.
45. Tabuc C, Marin D, Guerre P, Sesan T and Bailly JD, 2009. Molds and mycotoxin content of cereals in southeastern Romania. Journal of Food Protection, 72, 662-665.
46. Verderio A, Della Porta G , Valoti P, Fumagalli F, Mazzinelli G, Marchesini P, et al, 2005. Distribution of mycotoxins in Italian maize production. Informatore Agrario, 61, 47-51.