

기후변화가 곰팡이 및 곰팡이독소 발생에 미치는 영향

Influence of the climate change on growth of fungi and mycotoxin production

김동민, 전향숙*

Dong-Min Kim, Hyang-Sook Chun

한국식품연구원 안전성연구단

Food Safety Research Group, Korea Food Research Institute

I. 서론

지구 생태계 구성원들의 생존문제 뿐 아니라 정치, 사회, 경제적인 활동들은 기온, 강수량, 가뭄 등 기후에 의해 영향을 받는다. 이제는 ‘기후가 변화하고 있다’는 것이 많은 전문가들 뿐 아니라 일반 대중들에게도 널리 인정되고 있는 사실이다.

International Panel on Climate Change(IPCC)에 따르면 기후 변화란 수십 년 또는 그 이상 장기간에 걸쳐 지속되는 기후의 평균 상태나 그 변동 속에서 통계적으로 의미 있는 변동을 의미한다. 이것은 인위적이든 자연적이든 시간의 경과에 따른 기후의 변화를 포괄한다. 특히 산업화 이후에는 자연적인 영향보다 인위적인 요인들이 기후 변화에 더 큰 영향을 주고 있다. IPCC의 제4차 보고서에 따르면 1970년과 2004년 사이에 인위적인 온실 가스의 배출이 70% 증가했으며, 이중 이산화탄소의 연간 배출량은 약 80% 증가했다. 지구 온난화의 영향으로 지난 100년 간 지구 온도가 0.74°C 상승하였고 현재와 같은 상태라면 2100년까지 지구의 평균 기온이 최대 6.4°C

증가할 것이라고 예측했다. 또한 북극의 빙하가 21세기 말에는 완전히 없어질 것이고 폭염과 집중호우 등 극단적인 기후가 빈번하게 발생할 것으로 전망하고 있다.

기후 변화는 농작물들의 재배과정 뿐만 아니라 수확 후 저장과 유통 과정에서도 직접적, 간접적으로 영향을 준다. 따라서 주로 농작물들을 숙주로 성장하는 곰팡이의 발생과 곰팡이독소의 생산 역시 기후 변화에 의해 많은 영향을 받는다. 특히 우리나라는 식품 및 사료의 원료로 사용되는 곡류를 대부분 수입에 의존하고 있어 수입국의 기후 변화가 식품 중 곰팡이 및 곰팡이독소 오염에 크게 영향을 미칠 것으로 추측된다. 따라서 본고는 기온, 강수량, 상대 습도 등 기후요인들이 식품 중 곰팡이와 곰팡이독소의 발생에 미치는 영향을 살펴봄으로써 향후 기후 변화에 따른 곰팡이 및/또는 곰팡이독소 발생에 미치는 영향을 예측하고 대응 방안을 모색하는데 도움이 되고자 하였다.

II. 국내외 기후 변화 현황

1. 기온 상승

*Corresponding author: Hyang-Sook Chun
Food Safety Research Center, Korea Food Research Institute
516 Baekhyun-dong, Bundang-ku, Sungnam 463-746, Korea
Tel: +82-31-780-9321
Fax: +82-31-709-9876
e-mail: hschun@kfri.re.kr

앞으로 북반구의 고위도 육지 지역일수록 기온 상승이 뚜렷할 것이고 해안 지역보다 내륙에서 기온의 변화가 더 심할 것이라고 예측되고 있다. 중위도와 고위도의 대부분 지역에서 서리일(frost day)이 감소할 것이고 생육 시기 (growing season) 길이가 증가할 것으로 예측되고 있다 (1). IPCC의 A1B 시나리오에 의하면, 2100년에 이산화탄소의 농도가 현재의 2배에 해당하는 720 ppm이라고 가정했을 때 동아시아 지역의 기온은 약 3.3°C, 우리나라의 경우 트레와다의 기후 기준에 의거한 아열대기후가 점점 북상할 것으로 보이며, 1971-2000년 평균 대비 약 4°C 상승하고 극한 고온 및 저온 현상의 발생 빈도가 증가할 것으로 전망되고 있다(Fig 1).

2. 강수량 변화

IPCC의 보고서에 의하면 고위도 지역에서 강수량이 증가할 것이며, 대부분의 아열대 내륙 지역에서는 감소할 것

이라고 한다. 이에 따라 아시아와 중남미 지역의 강수량은 뚜렷하게 증가할 것이며 지중해 지역에서는 감소할 것으로 보인다. 지구 전체로 볼 때 강수량 부족으로 가뭄 피해를 입는 지역이 넓어질 것이다. 2100년에 동아시아 지역은 강수의 변동 폭이 커서 가뭄과 홍수 등의 극한 현상이 빈발할 것으로 보이고, 우리나라의 경우 호우 빈도가 증가하고 강수량은 17% 증가할 것으로 전망되고 있다.

3. 대기 중 이산화탄소 증가

산업혁명 이후 화석연료의 사용으로 많은 양의 이산화탄소가 대기 중으로 방출되고 있다. 산업혁명 이전 대기의 이산화탄소 농도는 약 280 ppm(v/v)으로 일정하였지만, 1950년대 이후 급격한 산업성장으로 대기 중 이산화탄소의 농도는 기하급수적으로 증가하였고 현재 380 ppm(v/v)에 이르고 있다. 대기 중 이산화탄소 농도의 증가는 지구온난화와 같은 기후 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 추정되고 있다. 우리나라의 최근 10년(1999~2008년) 동안 이산화탄소의 연평균 증가량은 2.3 ppm/year로 1998-2007년 사이에 측정된 지구 전체 평균 농도 증가량인 2.0 ppm/year를 상회하는 수준이다(2).

III. 기후 변화와 곰팡이 및 곰팡이독소의 발생

1. 곰팡이독소 발생과 식품 안전 문제

곰팡이에 의한 식품 오염을 줄이기 위한 노력에도 불구하고 식품 위해 곰팡이들은 자연계에 널리 퍼져있어 곡물, 견과류, 과일과 같은 식품원료와 이를 가공한 제품에서 빈번하게 발생한다(3). 곰팡이가 생성하는 2차 대사물인 곰팡이독소는 물리, 화학적 환경에 노출되었을 때 비교적 안정한 화합물로 곡물을 포함한 식품원료의 재배 단계부터 인간과 동물에 의해 소비될 때까지 food chain 전 과정에 걸쳐 오염될 수 있으며 지속적으로 노출되는 경우 인간과 동물의 건강에 심각한 영향을 줄 수 있다. 해충에 의한 공격 뿐 아니라 환경적인 조건과 영양 요소들은 곰팡이의 성장과 확산에 중요하다(4). 특히 기후 변화는 토지 이용, 곡물 생산 측면이나 토양 미네랄의 손실, 토양 미생물 생태계의 변화 등 토질(soil quality)의 변화뿐만 아니라 식품의 가공, 운송 및 저장 환경에도 미치는 영향이 크

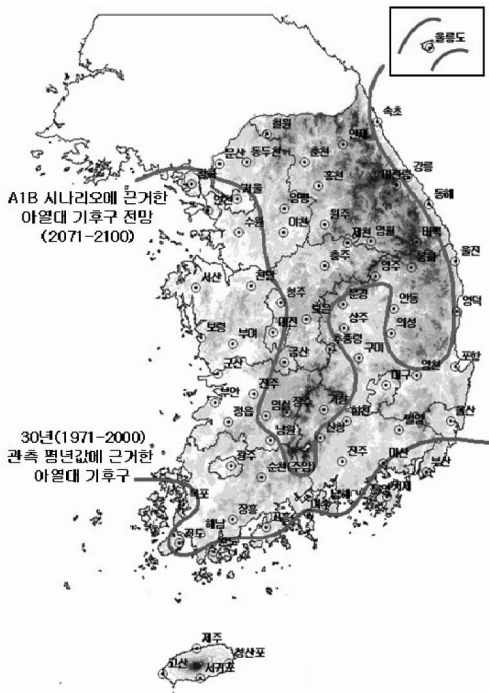


Fig 1. 한반도에서의 2071-2100년 아열대기후구의 변화 전망 (기준 1971-2000년), 트레와다의 기후 기준(국립 기상 연구소, 2007).

다. 곰팡이는 각 종마다 성장과 독소 생산에 있어 최적의 기온, 수분 활성도(a_w), 숙주 조건 등이 다르므로 기후 변화에 따른 곰팡이와 곰팡이독소 생산에 대한 연구는 개별적으로 이루어져야 할 것이다.

2. Aspergillus속 곰팡이 및 관련 곰팡이독소와 기후 변화

Aflatoxin은 견과류, 옥수수, 면실, 코프라(copra) 등 다양한 농식품에 오염되는 곰팡이독소로 주로 *Aspergillus flavus*에 의해 생산된다. Aflatoxin이 생성되는 최적 조건은 15-30°C로 관개시설을 갖춘 고온 사막지역, 고습도 온대지역, 가뭄이 심한 온대 기후 지역과 열대 지역에서 잘 발생한다. 특히 열대지역에서 날씨 패턴의 급격한 변화로 인해 aflatoxin이 다량 생성된 농작물을 인간이나 동물이 섭취하게 되면 심한 경우 급성 aflatoxin 중독 및 사망에 이를 수도 있다(5).

성장기의 농산물은 곤충이나 새, 동물 및 우박에 의한 기계적인 손상이나 고온 건조한 기후 스트레스를 받으면 *A. flavus*나 aflatoxin에의 오염이 증가된다. 특히 기후는 *A. flavus*의 오염에 직접적으로 영향을 준다. 즉, 기후 변화가 농작물의 성장을 변화시키거나 해충의 발생에 영향을 줌으로써 *A. flavus*의 오염을 용이하게 하여 aflatoxin

에의 오염을 증가시킨다. 예를 들면 피스타치오(pistachio)는 열과 가뭄 스트레스를 받으면 껍질이 깨져 조기 분열이 유발되어 *A. flavus* 및 aflatoxin에 더 쉽게 오염될 수 있다. 땅콩은 *A. flavus* 오염에 대한 감수성이 증가하면 phytoalexin 생산이 감소되어 식품방어 시스템에 문제가 발생됨으로써 *A. flavus* 및 aflatoxin에 더 쉽게 오염된다. 또한 옥수수의 경우 “silk cut”이 증가되면 옥수수 낱알이 손상되어 *A. flavus* 및 aflatoxin에의 오염이 증가된다(6).

기후 변화에 의한 aflatoxin 오염의 변화 사례를 들어 보면, 미국 Arizona에서 평소와는 달리 따뜻하고 습한 조건에서 bt 유전자가 삽입된 면실(bt cotton seed)에 5000 ppb 수준의 aflatoxin 오염이 발생했다고 보고되었다(4). 또 다른 사례로 1997년부터 2001년 까지 미국 남부 텍사스의 세 지역에서 조사된 결과에 의하면 면실 수확 시기나 수확 이전에 50 mm이상의 비가 내리면 aflatoxin 오염이 심해졌다(Fig 2). Fig 3에 나타나듯이 1999년과 2000년 동일한 지역에서 강수량과 aflatoxin의 발생경향을 보면 강수량이 증가될수록 aflatoxin 오염 정도가 증가되는 경향이다(6).

기후 변화는 aflatoxin을 생성하는 곰팡이의 양뿐 아니라 유형도 변화시킨다. 지역별로 aflatoxin을 생성하는 곰팡이의 종류가 다르며, 경작 방식에 따라 *A. flavus*의 주

Table 1. 곰팡이 성장과 곰팡이독소의 발생에 대한 최적 온도(°C)와 수분 활성도(a_w)

Fungus species	(mycotoxin)	Temp. (°C)	a_w	Reference
<i>Aspergillus flavus</i>	(Aflatoxin)	35 (33)	(0.99)	Hill et al., 1985
<i>Aspergillus ochraceus</i>	(Ochratoxin A)	30 (25-30)	(0.98)	Sanchis et al., 2004 Ramos et al., 1998
<i>Penicillium verrucosum</i>	(Ochratoxin A)	26 (25)	(0.90-0.98)	Sanchis et al., 2004 Cairns et al., 2003
<i>Aspergillus carbonarius</i>	(Ochratoxin A)	30-35 (15-20)	0.96 (0.93-0.96)	Tassou et al., 2007
<i>Fusarium graminearum</i>	(Deoxynivalenol)	20-22 (30)		Sanchis et al., 2004
<i>Fusarium graminearum</i>	(Zearalenone)	(25-30)	(0.98)	Sanchis et al., 2004
<i>Fusarium culmorum</i>	(Deoxynivalenol)	20-25 (26)		Sanchis et al., 2004
<i>Fusarium verticillioides</i>	(Deoxynivalenol)	(11)	(0.90)	Hope et al., 2003
<i>Fusarium verticillioides</i>	(Fumonisin)	30 (15-30)		Sanchis et al., 2004
<i>Fusarium proliferatum</i>	(Deoxynivalenol)	(11)	(0.90)	Hope et al., 2003
<i>Fusarium proliferatum</i>	(Fumonisin)	(10-30)	(0.93)	Marin et al., 1999

()는 곰팡이독소의 발생에 관한 최적 조건임

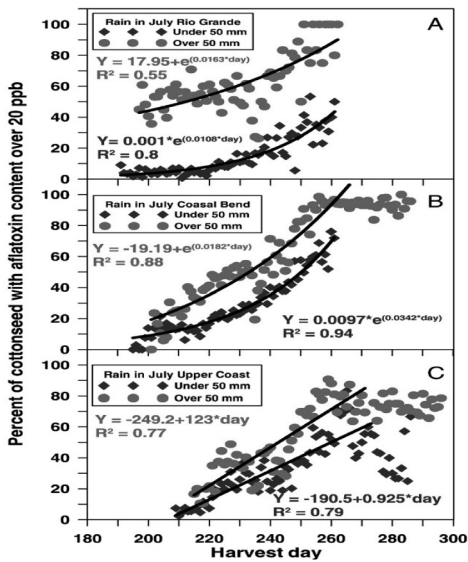


Fig 2. 조면(ginning) 시기 동안 20 ppb이상의 aflatoxin에 오염된 면실의 비율(%)과 1997~2001년까지 7월 강수량. 강수량: 50mm 이상(●), 50mm 이하(◆), 관측된 South Texas 세 지역: A (Rio Grande Valley), B (Coastal Bend), C (Upper Coast).

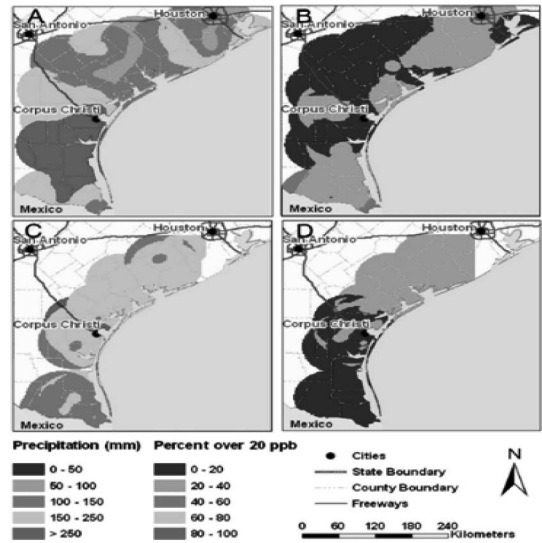


Fig 3. 1999년(A)과 2000년(B) 7월-8월에 내린 총 강수량의 지역별 경향과(C) 1999년과 (D) 2000년 South Texas에서 20 ppb 이상의 aflatoxin에 오염된 면실의 비율(%)

요 morphotype인 S와 L strain의 차이가 관찰되었다(7). 향후 지속되는 지구 온난화와 극한 날씨 변화로 인한 aflatoxin 오염도 변화로 농작물들의 성장 및 식품 원료의 사용에 더 많은 제약을 받을 것이다. 예를 들면 아시아, 아프리카, 아메리카의 따뜻한 지역에서 재배되는 작물인 옥수수의 경우, 최근 케냐에서 발생한 변덕스러운 날씨 변화에 따른 치명적인 aflatoxin 오염으로 인해 수출은 물론 식품 원료로서의 사용이 제한된 바 있다(5).

3. Penicillium속 곰팡이 및 관련 곰팡이독소와 기후 변화

Ochratoxin A는 주로 *Penicillium verrucosum*과 *Aspergillus ochraceus*에 의해 생산되는 곰팡이독소이다. 세계 각지에서 ochratoxin A 오염과 이로 인한 식중독이 많이 발생하고 있는데 *A. ochraceus*는 열대 및 아열대 지방에서, *P. verrucosum*은 북 유럽 및 캐나다의 온대 기후 지역에서 많이 발견된다(8, 9). 이와 관련하여 두 곰팡이들이 주로 오염되는 농작물의 종류에도 차이가 난다. 즉, *A.ochraceus*는 *P. verrucosum* 보다 고온 다습한 조건을

선호하므로 콩과 식물에서 잘 성장하나 *P. verrucosum*은 보다 낮은 온도와 습도에서도 성장할 수 있어 밀, 보리 등 곡류에서 많이 발생한다.

곰팡이의 성장과 ochratoxin A 생성에 수분활성도(a_w)와 온도가 중요한 요인으로 작용한다. *A. ochraceus*와 *P. verrucosum*을 대상으로 실험 한 결과 수분활성도가 감소하면 lag phase는 증가하고 발아속도는 감소하는 것으로 나타났다(Table 2).

*A. ochraceus*가 ochratoxin A를 생성하는데 있어 최적 온도 범위는 25-30°C, 최적 a_w 는 0.98이며 *P. verrucosum*은 각각 25°C와 0.90-0.98이다(10). 곰팡이의 최적 성장 조건과 ochratoxin A 최대 발생 조건은 차이가 있다는 결과가 보고되었다. 포도에서 빈번하게 발생되며 ochratoxin A를 생성하는 것으로 알려진 곰팡이인 *A. carbonarius*의 성장 속도 및 ochratoxin A 생산에 온도와 수분활성이 미치는 영향을 조사한 결과, 곰팡이 최적 성장 조건은 30-35°C, 0.96 a_w 이었으나 최대 ochratoxin A 생산은 15-20°C, 0.93-0.96 a_w 에서 나타났다(11).

스페인에서 기후 변화와 포도에서 조사된 black aspergilli 양과의 관계를 알아보기 위해 4개 와인 생산 지역별로 10개씩 총 40개 포도밭에서 2002년과 2003년 6,

Table 2. 다른 온도와 수분 활성도 조건에서 *A. ochraceus* 와 *P. verrucosum*의 발아 전 lag phase (days)와 발아 속도(spore h⁻¹) 비교

	a _w	Lag timed (d)		Germination rate (spores h ⁻¹)	
		<i>A. ochraceus</i> ^a	<i>p. verrucosum</i> ^b	<i>A. ochraceus</i> ^a	<i>P. verrucosum</i> ^b
30°C	0.99	0.3-0.7	0.6-0.8	15.67-48.13	24.19-31.49
	0.95	0.3-0.5	0.6-0.7	12.35-42.64	20.35-21.73
	0.90	0.4-0.8	1.5-1.6	7.35-23.41	4.56-5.66
	0.85	1.3-1.6	3.8-4.8	2.66-5.94	0.38-0.46
	0.80	3.3-16.6	>60	0.07-0.41	-
20°C	0.99	0.4-1.0	0.4-0.5	8.09-39.26	21.8-31.3
	0.95	0.6-0.8	0.5-0.6	7.78-23.79	18.06-34.69
	0.90	1.2-2.0	1.2-1.4	4.17-21.96	9.17-9.0
	0.85	2.9-4.6	3.7-4.3	1.53-3.43	0.94-1.09
	0.80	6.6-36.4	18.8-33.3	0.03-0.52	0.02-0.13
10°C	0.99	2.7-23.5	1.2-1.5	0.12-3.24	5.67-8.03
	0.95	4.9-28.7	1.0-1.2	0.24-2.23	8.44-12.05
	0.90	6.2-36.1	2.3-2.4	0.11-1.01	2.25-2.30
	0.85	>60	20.6-22.3	-	0.22-0.75
	0.80	>60	>60	-	-

^a Data obtained from: Pardo et al. (12) ^b Data obtained from: Parde et al. (13)

- Spore germination was not observed.

Table 3. Sampling 시기 별로 2001, 2002, 2003 년도 각 지역의 평균 기후 자료 1(June), 2(July), 3(August)

Region	sampling	T max ^a (°C)	T mean ^b (°C)	T min ^c (°C)	R.H.(%)	Rainfall (mm)	Rain (days)
Utiel-Requena	1	30.3	22.9	15.5	62.1	10.2	1.3
	2	32.4	25.0	17.5	63.4	0.0	0.0
	3	32.3	25.3	18.2	65.5	21.7	2.0
Rioja	1	27.2	20.5	13.7	52.9	37.4	7.0
	2	27.6	20.9	14.3	52.5	23.8	5.0
	3	29.1	22.3	15.4	55.3	29.3	7.3
Penedés/ Conca de Barverà	1	29.2	22.6	16.5	62.2	20.8	4.3
	2	26.7	23.5	17.3	67.7	31.1	6.7
	3	30.7	24.0	18.2	68.9	21.8	4.7
Costers del Segre	1	30.9	23.1	15.8	58.2	11.5	3.0
	2	30.8	23.6	17.0	64.7	61.1	9.0
	3	32.4	25.1	18.2	62.6	20.5	4.7

(INM, 2003)

^aT max: mean daily maximum temperature for each sampling stage

^bT mean: mean daily mean temperature for each sampling stage

^cT min: mean daily minimum temperature for each sampling stage

R.H.: mean daily R.H. for each sampling stage

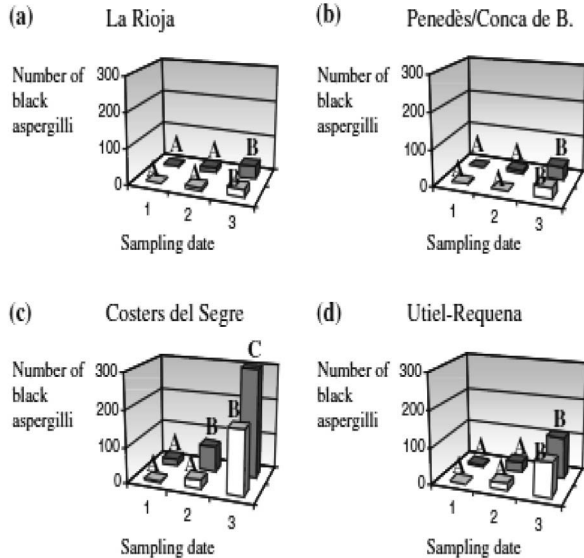


Fig 4. 스페인의 4개 와인 생산 지역에서 2002년(□)과 2003년(■)에 조사된 포도 중 black aspergilli. 세 시기에 sampling(매 시기 2000개 포도) : (1)1개월 후, (2)브레중 시기, (3)수확기. bar의 알파벳은 시기 별로 곰팡이 수에서의 유의적 차이를 의미함.

7, 8월에 시료를 수집한 다음 black aspergilli를 조사하였다. 그 결과, Table 3과 Fig 4에 나타나듯이 가장 고온을 나타낸 수확시기(sampling 3)와 지역(Costers del Segre)에서 black aspergilli양이 가장 높게 측정되었다(14). 이상의 결과로부터 기후 요인과 농작물에 따라 곰팡이의 발생 및 ochratoxin A 생산이 다르게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

기후 변화에 따른 포도 재배 및 와인 생산 지역의 변동에 관한 예측도 가능하다. 예를 들어 지구 온난화의 영향으로 포도의 재배 한계선이 북위도로 올라감에 따라 스코틀랜드는 근세기 이내에 백포도주를 생산하는 환경에 적합하여 지금 보다 ochratoxin A 오염도가 증가할 수 있다. 반면 현재 와인을 생산하는 이탈리아의 지중해 지역과 스페인의 Rioja는 와인 생산에 차질을 빚게 되어, 좀 더 높은 서늘한 지역으로 포도밭이 이동하게 될 것으로 전망된다.

4. Fusarium속 곰팡이 및 관련 곰팡이독소와 기후 변화

Fusarium속 곰팡이가 생산하는 주요 곰팡이독소로는

deoxynivalenol, zearalenone, fumonisin 등이 있다. Fusarium속 곰팡이의 성장과 독소생성의 최적 온도는 20-25°C로 알려져 있어 미국, 유럽 및 아시아의 온대 지역에서 생산된 곡류에서 흔히 발견된다. Fusarium 속 속하는 곰팡이들은 성장에 필요한 수분만 주어지면 5-10°C 이하의 저온에서도 곰팡이독소 생산이 가능한 것으로 알려져 있다.

*Fusarium graminearum*은 밀에서 식물병인 Fusarium head blight(FHB)을 유발하며 deoxynivalenol을 생산하는 주요 곰팡이로 알려져 있다. FHB가 발생하면 deoxynivalenol, nivalenol 및 zearalenone 등의 곰팡이 독소가 생성된다. FHB의 발생은 기상조건과 밀접한 관계가 있어, 우리나라에서는 1963년에 전국적으로 많이 발생하였고 이후 1974년, 1990년, 1998년에도 간헐적으로 발생하였다. FHB가 발생했을 때는 다른 해보다 4월 평균 기온이 2.2-3.3°C, 평균습도가 3-8%, 강수량도 50 mm 정도 높은 기후 특성을 보였다(15).

2002-2005년도까지 벨기에에서 개화기 밀의 FHB 발생률을 조사한 결과 기후에 따라 곰팡이 우점종이 다른 특성을 나타내었다(16). FHB의 발생은 밀의 개화기 때 접종원(inoculum)의 양과 기후 조건과 관련이 있다. Fusarium속 곰팡이가 접종되고 성장하는 최적 조건은 습한 조건에서 기온이 20-30°C일 때이다. 일반적으로 개화기부터 초기 호숙기(early dough stage)까지 곰팡이 오염에 대한 감수성이 가장 큰데, 밀 성장기 동안의 상대적인 강수량, canopy가 축축한 기간, 온도조건 등의 요인에 의해 곰팡이 오염정도가 결정된다. 농작물의 종류에 따라라도 곰팡이 오염의 최적 조건이 다른데 밀의 경우 개화기에 집중호우가 발생하면 Fusarium 곰팡이의 접종원이 밀 이삭에 잘 분산되며 이후 따뜻하고 습한 조건이 유지되면 곰팡이에 쉽게 오염된다. 반면, 옥수수의 경우 성장기에 온화한 기온과 mild한 강수량 조건에서 Fusarium 곰팡이에 쉽게 오염된다(17, 18). Fig 5에 나타나듯이 2002년과 2005년에 비교적 많이 발생된 *F. culmorum*은 *F. graminearum* 보다 더 낮은 기온 조건에서, *F. poae*는 추운 조건에서 더 많이 발생하는 것으로 보인다(19, 20).

캐나다 남부와 동부 Ontario 지방에서 4년간 매 수확기에 곡류 중 deoxynivalenol 오염농도 변화에 영향을 주는 요인을 조사한 결과, 연도별 차이(48%), 품종(27%), 이전 수확물(14-28%)의 순으로 나타났으며, 같은 시기에

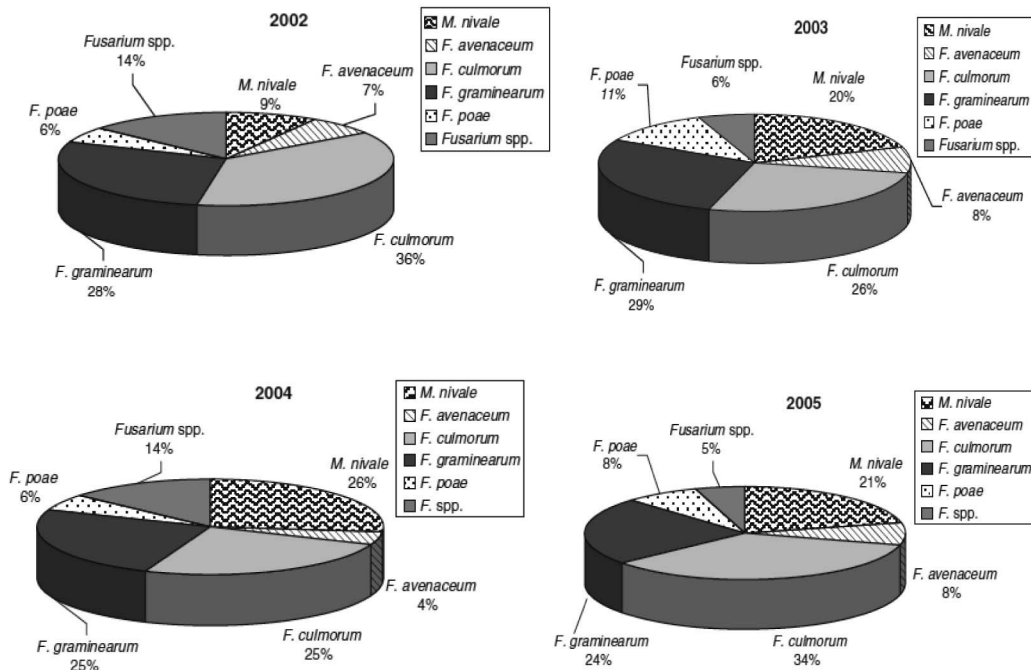


Fig 5. 2002-2005년 Flander 지역의 밀에서 발생하는 Fusarium species별 발생 비율(%)

도 지역이 다르면 deoxynivalenol 농도가 변화하는 것으로 나타났다(21). 등숙 기간(grain ripening) 동안 밀에서 *F. graminearum*과 *F. culmorum* 오염에 의해 유발되는 deoxynivalenol 생성은 개화기 때 습도 조건이 중요하다. 또한 a_w 와 기온의 변화는 두 곰팡이의 성장과 deoxynivalenol 생산에 큰 영향을 준다. *F. graminearum*과 *F. culmorum*는 $a_w > 0.90$ 에서만 성장하고 곰팡이와 곰팡이 독소 생산의 최적 온도는 25°C이다. *F. graminearum*과 *F. culmorum* 외에 deoxynivalenol을 생산하는 *F. verticillioides*, *F. proliferatum*의 경우 독소 생산의 최적 온도는 11°C, a_w 는 0.90이다. 이상을 종합하면 연도별, 지역별 기후 요소의 차이가 *Fusarium*속 곰팡이의 종류 및 deoxynivalenol 오염 정도를 결정짓는 중요한 요인인 것으로 보인다.

다년간 축적된 자료를 바탕으로 기후 변수와 농경제적인 변수들에 따른 deoxynivalenol 발생의 변화를 modeling하여 deoxynivalenol 발생 예측 시스템이 개발되었다. 캐나다에서는 Ontario 지방에서 재배된 밀 data를 이용해 'DON cast'라는 예측 모델을 개발하였다(22). 독일에서

는 밀의 개화를 전후하여 deoxynivalenol의 발생을 예측하는 모델이 개발되었으며, 스위스에서는 deoxynivalenol이 0.5mg/kg 이하 농도로 오염된 밀 시료에 대해 78%의 정확도로 예측 가능한 모델이 개발되었다.

Fumonisin은 곡류의 재배와 저장 기간 동안 주로 *F. verticillioides*, *F. proliferatum*에 의해 생산된다. *F. verticillioides*은 옥수수의 뿌리, 줄기, 낱알 등 전 부분의 식물병 발생과 관련이 있는 곰팡이로 주로 온대 기후 조건인 북아메리카와 남부 유럽 등지에서 많이 발견된다. 습한 조건이 지속되면 옥수수 수염에 *F. verticillioides* 오염이 촉진되는 것으로 조사되었다(23). 또한 *F. verticillioides*, *F. proliferatum* 모두 a_w 가 0.9이상으로 높을 때 잘 자라는 것으로 보고되었다. 옥수수 중 fumonisin 오염 농도는 수확전과 수확 시기 동안의 온도, 상대 습도, 강수량 및 곤충에 의한 손상 정도와 밀접한 관계가 있다. Table 4에 나타난 바와 같이 아르헨티나와 필리핀에서 옥수수 중 fumonisin 농도에 영향을 주는 요인을 관찰한 결과 기후(47%), 곤충에 의한 손상(17%), 육종(14%)의 순으로 영향을 주었다(24).

Table 4. 지역(날씨), 육종, Bt 유전자 및 곤충 손상이 fumonisin 발생에 미치는 영향

Highest Order Effect in Linear Model ^a	Variation Explained by Effect ^b (%)
Location	47
Hybrid	14
Bt	11
Insect Damage Level (INSECT)	17
Location × Hybrid	51
Location × Bt	58
Location × INSECT	58
Location × Hybrid × Bts	63
Location × Hybrid × Bt × INSECT	63

^a Components of interactions were included in the models as simple effects.

^b R^2 of each model. All models were significant at $p < 0.0001$.

IV. 결론

지구 온난화는 산업화 이후 지속적으로 증가해왔으며 앞으로 가속화될 것으로 생각된다. 이러한 변화는 기온의 상승, 극단적인 강수량의 차이 등을 유발하는 것으로 보이며 지구 생태계 전반적으로 영향을 주고 있다. 세계 각국들은 이러한 영향에 대처하기 위해 1988년 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)를 설립하고 1992년 리우 기후변화협약을 맺어 이산화탄소 배출량의 안정화를 도모했으며 1997년 선진국의 구속력 있는 양적 감축의무를 명문화한 교토의정서를 채택하였다.

기후 변화는 토지 이용, 농작물 생산, 토질의 변화(토양 미네랄의 손실, 토양 미생물 생태계의 변화) 뿐만 아니라 농작물 및/또는 식품의 제조, 운송과 저장 환경에도 크게 영향을 미친다. 특히 기온, 상대습도, 강수량 등 기후 요소들의 변화는 농작물이나 식품을 숙주로 삼아 발생하는 *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*속 곰팡이의 성장과 aflatoxin, ochratoxin, deoxynivalenol, fumonisin 등의 곰팡이독소 발생에 큰 영향을 주어 인간과 동물의 건강에 심각한 악영향을 초래할 수 있다. 이에 대해 유럽 및 북미 일부 국가에서는 장기간 지역별, 시기별 곰팡이독소의 발생 양상에 관한 자료를 지속적으로 축적하여 곰팡이독

소의 발생을 예측하는 모델을 개발 및 보완해 나감으로써 기후변화에 대응한 식품안전 관리체계를 구축해나갈 뿐만 아니라 나아가 자국의 미래 식량안보에 노력을 기울이고 있다. 따라서 국내에서도 기후 변화가 곰팡이 오염 및 곰팡이독소 발생에 미치는 영향을 예측할 수 있는 기반자료 마련, 신뢰성 있는 예측기술 개발 및 대응책 마련 등에 관한 시도가 필요하다.

참고문헌

- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Rattquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., & Miller, H.L. (Eds), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York. <<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-ts.pdf>>.
- 기상청 climate change handbook, 2009
- Murphy, P. A., Hendrich, S., Landgren, C., & Bryant, C. M. (2006). Food mycotoxins: an update. *Journal of Food Science*, 71, R51-R65.
- Magan, N., Hope, R., Cairns, V., & Aldred, D. (2003). Post-harvest fungal ecology: Impact of fungal growth and mycotoxin accumulation in stored grain. *European Journal of Plant Pathology*, 109(7), 723-730.
- Lewis, L., Onsongo, M., Njapau, H., Schurz-Rogers, H., Lubber, G., Kieszak, S., Nyamongo, J., Backer, L., Mohamud Dahiye, A., Misore, A., DeCock, K., Rubin, C., & the Kenya Aflatoxicosis Investigation Group. (2005). Aflatoxin contamination of commercial maize products during an outbreak of acute aflatoxicosis in eastern and central Kenya. *Environmental Health Perspectives*, 113(12), 1763-1767.
- Cotty, P. J., & Jaime-Garcia, R. (2007). Influences of climate on aflatoxin producing fungi and aflatoxin contamination. *International Journal of Food Microbiology*, 119(1-2), 109-115.
- Horn, B. W., & Dorner, J. W. (1999). Regional differences in production of aflatoxin B1 and cyclopiazonic acid by soil isolates of *Aspergillus flavus* along a transect within the United States. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(4), 1444-1449.
- Mantle P. G. (2002). Risk assessment and importance of ochratoxins. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 50: 143-146.
- Sauer, D. B., Meronouk, R.A. & Christensen, C. M. (1992) Microflora. In: D.B. Sauer (editor), Storage of Cereal Grains and their Products. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, pp. 313-340.
- Sanchis, V., & Magan, N. (2004). Environmental conditions affecting mycotoxins. In N. Magan & M. Olsen (Eds.), Myco-

- toxins in food: Detection and control (pp. 174-189). Boca Raton, FL: CRC Press.
11. Tassou, C. C., Natskoulis, P. I., Panagou, E. Z., Spiropoulos, A. E., & Magan, N. (2007). Impact of water activity and temperature on growth and ochratoxin A production of two *Aspergillus carbonarius* isolates from wine grapes in Greece. *Journal of Food Protection*, 70(12), 2884-2888.
 12. Pardo, E., Mari'n, S., Solsona, A., Sanchis, V., & Ramos A. J. (2004) Modelling of germination and growth of ochratoxigenic isolates of *Aspergillus ochraceus* as affected by water activity and temperature on a barley-based medium. *Food Microbiology*, 21:267-74.
 13. Pardo, E., Malet, M., Mari'n, S., Sanchis, V., & Ramos, A. J. (2006). Effects of water activity and temperature on germination and growth profiles of ochratoxigenic *Penicillium verrucosum* isolates on barley meal extract agar. *International Journal of Food Microbiology*, 106: 25-31.
 14. Belli', N., Mitchell, D., Mari'n, S., Alegre, I., Ramos, A. J., Magan, N., Sanchis, V. (2005). Ochratoxin A-producing fungi in Spanish wine grapes and their relationship with meteorological conditions. *European Journal of Plant Pathology*, 113(3), 233-239.
 15. 농진청 표준영농교본 개정판-118
 16. Isebaert, S., De Saeger, S., Devreese, R., Verhoeven, R., Maene, P., Heremans, B., & Haesaert, G. (2009). Mycotoxin-producing *Fusarium* species occurring in winter wheat in Belgium (Flanders) during 2002-2005. *Journal of Phytopathology*, 157(2), 108-116.
 17. Jenkinson, P., & Parry, D. W. (1994). Splash dispersal of conidia of *Fusarium culmorum* and *Fusarium avenaceum*. *Mycological Research*, 98, 506-510.
 18. Parry, D. W., Jenkinson, P., & McLeod, L. (1995). *Fusarium* ear blight (scab) in small grain cereals - A review. *Plant Pathology*, 44(2), 207-238.
 19. Jennings, P., Coates, M. E., Walsh, K., Turner, J. A., & Nicholson, P. (2004). Determination of deoxynivalenol- and nivalenol-producing chemotypes of *Fusarium graminearum* isolated from wheat crops in England and Wales. *Plant Pathology*, 53(5), 643-652.
 20. Waalwijk, C., Kastelein, P., De Vries, I., Kere'nyi, Z., Van Der Lee, T., Hesselink, T., Arts, J., Köhl, J., & Kema, G. H. J. (2003). Major changes in *Fusarium* spp. in wheat in the Netherlands. *European Journal of Plant Pathology*, 109(7), 743-754.
 21. Schaafsma, A. W., Tamburic-Ilincic, L., Miller, J. D., & Hooker, D. C. (2001). Agronomic considerations for reducing deoxynivalenol in wheat grain. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 23(3), 279-285.
 22. Hooker, D. C., Schaafsma, A. W., & Tamburic-Ilincic, L. (2002). Using weather variables pre- and post-heading to predict deoxynivalenol content in winter wheat. *Plant Disease*, 86(6), 611-619.
 23. Munkvold, G. P., & Desjardins, A. E. (1997). *Fusarium* in maize. Can we reduce their occurrence? *Plant Disease*, 81, 556-565.
 24. Schaafsma, A. W., & Hooker, D. C. (2007). Climatic models to predict occurrence of *Fusarium* toxins in wheat and maize. *International Journal of Food Microbiology*, 119(1-2), 116-125.