

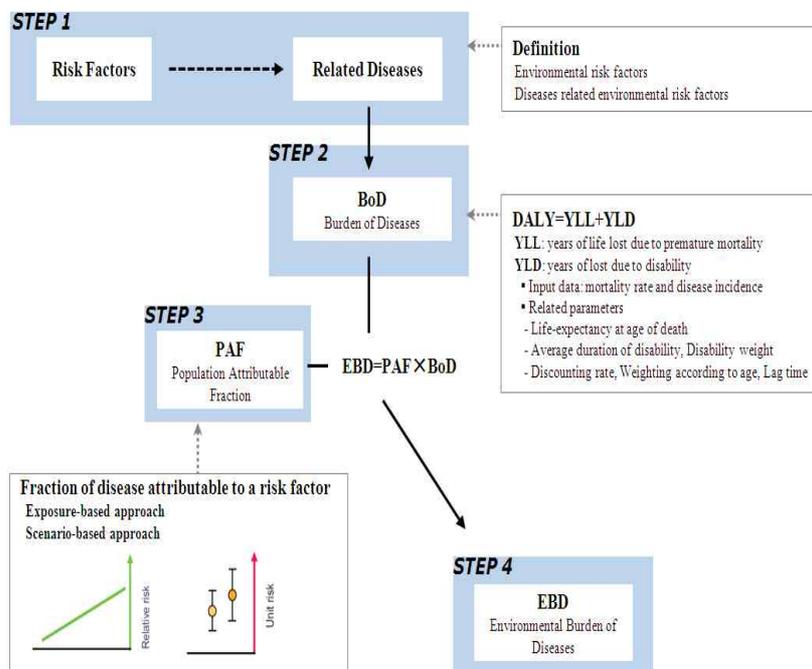
기후변화와 환경영향

2차시. 기후변화로 인한 질병부담

1. 환경성 질병부담 산출 방법

환경성 질병부담(Environmental Burden of Disease; 이하 EBoD)은 환경성 위험요인(environment factor)으로 야기될 수 있는 질병(disease)의 부담을 측정하는 것으로서, 현재의 건강상태와 환경노출이 감소 또는 제거됨으로서 나타날 수 있는 건강상태의 차이를 나타내는 지표로 정의할 수 있다.

EBoD 평가는 크게 4단계의 과정을 거쳐서 추정된다. 첫째 환경위험요인과 관련 질병의 정의, 둘째 해당 질병에 대한 질병부담 계산, 셋째 환경위험요인으로 인한 관련 질병에의 기여분(attributable fraction) 계산, 넷째 해당 질병의 질병부담과 기여분을 이용한 EBoD의 추정이다. 각 단계에는 최종적인 EBoD 값을 산출하는데 있어 관련되는 범위 및 정의, 활용되는 자료 그리고 추정에 있어 필수적인 모수의 가정 및 결정이 요구된다. 다음 <그림 1>은 EBoD 평가의 단계를 도식화한 것이다.



<그림 1> EBoD 평가 단계

(1) 환경위험요인 및 관련 질병의 정의

WHO는 2002년과 2004년 사이에 발간한 건강영향에 대한 26개의 주요한 예방 가능한 위험요인의 건강영향에 대한 보고서에서 국제적으로 건강에 영향을 주는 26개의 위험 요인을 비교하였고, 이중 환경과 관련된 6가지 환경적, 직업적 위험요인을 제시하였다. WHO는 2006년에 발간한 ‘건강한 환경을 통한 질병예방(Preventing disease through healthy environments: towards an estimate of the global burden of disease)’을 통하여 환경중재로 예방 가능한 전 지구적 질병부담을 추정하였다.

WHO의 2006년 보고서에서 제시된 예방 가능한 환경정의는 이전에 연구된 6개의 환경 위험요인을 바탕으로 하여

전 세계 100여명의 전문가들이 체계적인 문헌고찰을 통해 제시한 것이다. 또한 이 보고서에서는 WHO에서 분류한 102개의 주요 질병 및 손상 중 85개 질병이 환경요인으로 인해 발생할 수 있으며, 이들은 예방 가능한 것으로 보고하였다. 덧붙여 이러한 질병에 대한 환경적 기여는 해당 지역, 경제적인 상태, 연령 및 성별, 이용 가능한 자료 및 전문가 수준에 따라서 달라질 수 있음을 밝히고 있다.

최근에 WHO가 2008년에 발간한 'Environmental burden of disease series'에서 제공하는 환경 위험요인은 10가지로 선정되어 있다. 다음 <표 1>은 이 시리즈에서 선정한 환경위험요인에 대해 정리한 것이다.

<표 1> EBoD 산출 가이드라인에 선정된 환경 위험요인(WHO, 2008)

- 고체 연료 사용으로 인한 실내 대기오염(Indoor smoke from solid fuel use)
- 실외 대기오염(Outdoor air pollution)
- 물오염 및 위생(Water, sanitation & hygiene)
- 자외선(Solar ultraviolet radiation)
- 기후변화(Climate change)
- 납(Lead)
- 수은(Mercury)
- 작업장 발암물질(Occupational carcinogen)
- 작업장 대기분진(Occupational airborne particulates)
- 간접 흡연(Second-hand smoke)

(2) 환경위험요인으로 인한 관련 환경성 질병에의 기여분 산정 방법론

환경위험요인으로 인한 기여분을 산정하는 방법론을 서술하기에 앞서 질병부담(Burden of Disease; 이하 BoD)에 대한 것을 정리하였다. BoD는 일반적으로 장애보정생존년수(Disability Adjusted Life Years; 이하 DALY)로서 정의된다. 이러한 DALY는 조기사망으로 인한 질병부담(Years of Life Lost; 이하 YLL)과 상병으로 인한 질병부담 또는 장애부담(Years Lived with Disability; 이하 YLD)의 합으로 계산된다. 다음은 DALY 계산 공식이다.

$$DALY = YLL + YLD$$

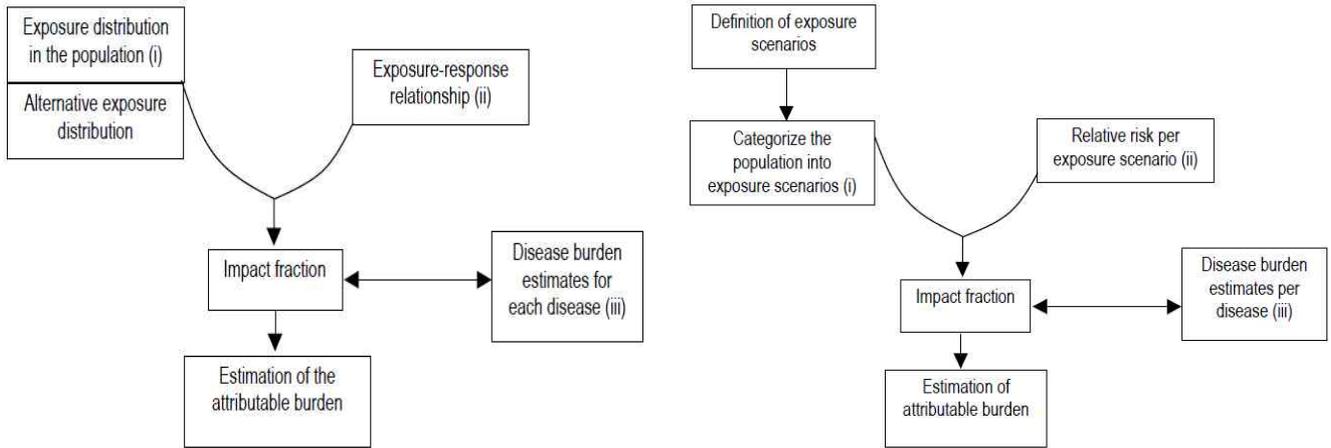
$$YLL = \frac{KCe^{ra}}{(r + \beta)^2} [e^{-(r + \beta)(L + a)} [-(r + \beta)(L + a) - 1] - e^{-(r + \beta)a} [-(r + \beta)a - 1]] + \frac{1 - k}{r} (1 - e^{-rL})$$

$$YLD = DW \left[\frac{KCe^{ra}}{(r + \beta)^2} [e^{-(r + \beta)(L + a)} [-(r + \beta)(L + a) - 1] - e^{-(r + \beta)a} [-(r + \beta)a - 1]] + \frac{1 - k}{r} (1 - e^{-rL}) \right]$$

여기에서 각각의 모수에 대한 설명을 생략한다.

WHO에서 제시한 EBoD 평가 가이드라인에서는 환경 관련 질환에 대한 환경 위험요인의 인구집단 기여분

(Population Attributable Fraction; 이하 PAF) 산출을 크게 노출기반접근법(exposure-based approach)과 시나리오 기반접근법(scenario-based approach)으로 구분하여 제시되고 있다(WHO, 2008). 다음 <그림 2>는 WHO의 EBoD 평가에서 AF 산출 방식에 따른 방법론을 도식화한 것이다.



<그림 2> WHO PAF 산출 방식에 따른 EBoD 평가 접근법(WHO, 2008)

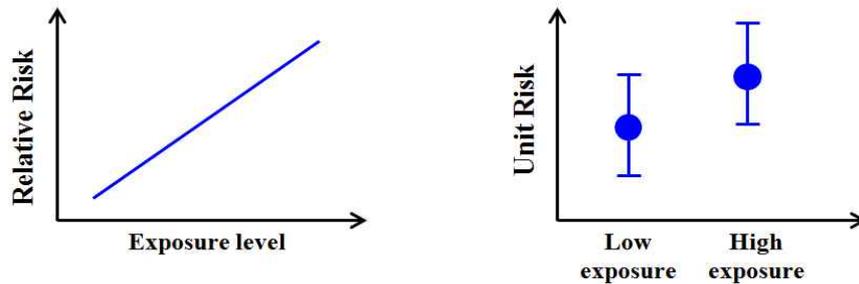
노출기반접근법은 노출자료(exposure data)와 상대위험비(Relative Risk; 이하 RR)를 활용하여 계산하는 반면에 시나리오기반접근법은 시나리오(scenario)를 통한 노출정보(exposure information)와 단위위험(Unit Risk; 이하 UR)을 활용하여 계산한다. 하지만 실제 PAF 산출방식은 환경위험요인자료의 해상도 및 활용수준에 따라서 다양하게 적용될 수 있다. 또한 환경위험요인과 건강영향과의 관계를 정량화한 노출반응함수(exposure response function)의 종류에 따라서도 달라질 수 있다.

PAF 산출과 관련하여 먼저 노출반응함수의 종류에 대해서 정리하였다. PAF 산출의 기본이 되는 상대위험비와 단위위험은 노출반응함수의 한 형태인데, 이외에도 많은 역학연구에서 도출되는 노출반응함수로는 오즈비(Odds Ratio; 이하 OR)가 있다. RR은 노출로 인한 질병 발생 위험의 증가 정도로 정의된다. 그 공식은 노출 집단에서의 발생 위험과 비노출 집단에서의 발생 위험으로 정의되며, 계산 공식은 다음과 같다.

$$RR = \frac{Risk_{\text{exposed}}}{Risk_{\text{non-exposed}}}$$

반면에 UR은 특정 노출에 기대되는 절대적인 사례 수(number of case)를 제공한다. 그리고 기본적인 질병 발생에 독립적인 효과를 위해 도출될 수 있다. 사례 수는 직접적인 노출정도에 UR을 곱해줌으로서 추정될 수 있다. 다

음 <그림 3>은 RR과 UR에 대해 도식화한 것이다.



<그림 3> 상대위험비와 단위위험(THL, 2011 수정)

OR는 비노출 그룹에서의 질병 발생 오즈(odds)에 대한 노출 그룹에서의 질병 발생 오즈의 비로 계산된다. OR은 전형적인 역학연구에서 추정되는데, 연구 대상의 그룹은 그들의 노출 상태에 의해서 선택되어 노출 그룹에 대한 비가 일반 집단으로 바로 연결되지는 않는다. 하지만 비노출 집단의 질병 유병률이 상대적으로 낮을 때에(일반적으로 <10%) OR는 단위노출에 대한 RR의 추정치로 사용된다.

PAF의 산출은 상대위험비 및 단위위험으로 나타나는 비교위험도를 통한 기여분(Attributable Fraction; 이하 AF)을 인구집단으로 고려한 것이다. AF의 계산 공식은 다음과 같다.

$$AF = \frac{RR - 1}{RR}$$

여기에서 위험요인에 노출된 인구집단의 분포를 고려하게 되면 PAF가 산출되게 되는데, PAF의 계산 공식은 다음과 같다.

$$PAF = \frac{Pe(RR - 1)}{Pe(RR - 1) + 1}$$

여기에서 Pe는 위험요인에 노출되는 인구집단의 비율을 의미하며, RR은 상대위험비로서 위험요인에 노출되는 인구집단에서의 참조되는 노출수준에 비해 위험요인에 노출된 정도에서의 상대위험비로 계산된 것이다. 만일 모든 인구가 위험요인에 노출되게 되면(즉 Pe=1) PAF는 AF와 동일하게 된다.

최종적으로 환경요인으로 인한 질병부담은 환경요인의 노출과 관련된 질병의 질병부담(BoD)에 PAF를 곱해줌으로

서 계산된다. 다음은 최종적인 EBoD의 계산공식이다.

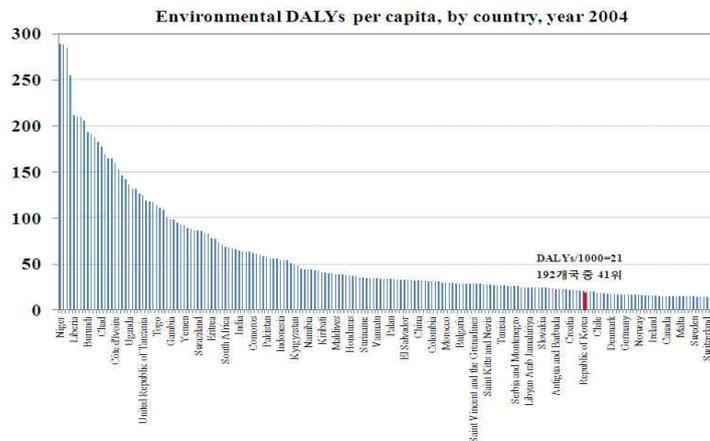
$$EBD = PAF \times BoD$$

2. 환경성질병부담의 활용과 한계

(1) 환경성질병부담의 활용

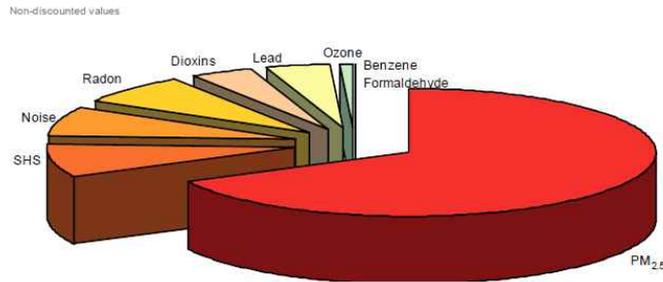
EBoD 평가는 WHO를 비롯한 유럽 각국에서 환경보건정책 수립, 시행, 평가에 있어 과학적·정량적 근거자료로 활용되고 있다.

WHO는 2007년(2004년 자료기준)(WHO, 2007)과 2009년(2004년 자료 update)(WHO, 2009)에 192개 회원국의 국가별 환경성 요인으로 인한 건강영향 분석 자료를 발표하여, 각 국가의 정책 결정자가 환경 및 건강 분야에서 정책적 우선순위를 정하는데 활용도록 하였다. 그 중 2007년에 발표된 WHO 보고서에서는 우리나라가 192개 회원국 중 41위로 평가되었다<그림 4>.



<그림 4> 국가별 환경성질병부담 산정(2004년 자료기준)(WHO, 2007)

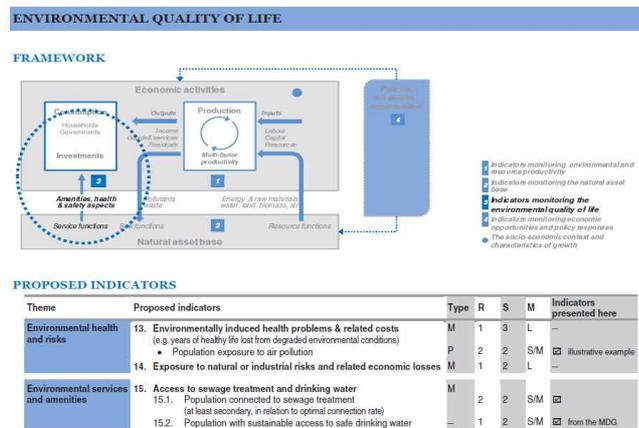
유럽 6개국(핀란드, 프랑스, 네덜란드, 독일, 이탈리아, 벨기에)의 특정 환경 위험요인 및 관련 질환을 대상으로 수행된 2011년 EBoD 평가보고서는 국가별 비교, 각 나라별 상대적인 환경 위험요인 평가 결과를 제시한다(THL, 2011). 이 보고서에서 PM2.5는 환경위험인자 중 70% 이상을 차지하는 주요 원인물질로 추정하였다<그림 5>.



자료: National Institute for Health and Welfare(THL), European Perspectives on Environmental Burden of Disease, Helsinki, 2011

<그림 5> 유럽 6개국의 환경위험인자의 비중

OECD에서는 녹색성장(Green growth)의 모니터링 지표로서 삶에 대한 환경질(Environmental quality of life)에 대한 지표로 EBoD를 제안하고 있다<그림 6>(OECD, 2011). 실제로 네덜란드의 2011년 녹색성장(Green growth) 보고서에서는 삶에 대한 환경질 지표로 EBoD를 활용하였다.



자료: OECD, Towards Green Growth: Monitoring Progress, 2011

<그림 6> OECD의 삶에 대한 환경질 지표제안

(2) 환경성 질병부담의 한계

EBoD 평가는 다음과 같은 한계를 가진다(WHO, 2003). 첫째, EBoD 추정값은 환경 위험요인에 대한 중요도 (important aspects of risk)를 고려하지 못한다. 달리말해서 EBoD 추정값으로 환경 위험요인의 우선순위가 결정되지만, 실제로는 개인 및 인구집단에 영향을 줄 수 있는 태도(형평성, 불확실성, 공포 등)는 포함하지 못한다는 것이다. 둘째, EBoD 추정값은 건강이익(health gain) 이외에 나타날 수 있는 편익을 추가로 나타낼 수 없다. 이는 환경적 중재로 인한 EBoD 추정값의 감소가 나타날 수 있으나 사회적인 이익(수질 개선으로 인한 식량 생산의 증가 등)은 포함하지 못한다는 것이다. 셋째, EBoD 평가에 있어 필수적인 질병부담(Borden of Disease)의 산출 시에 활용

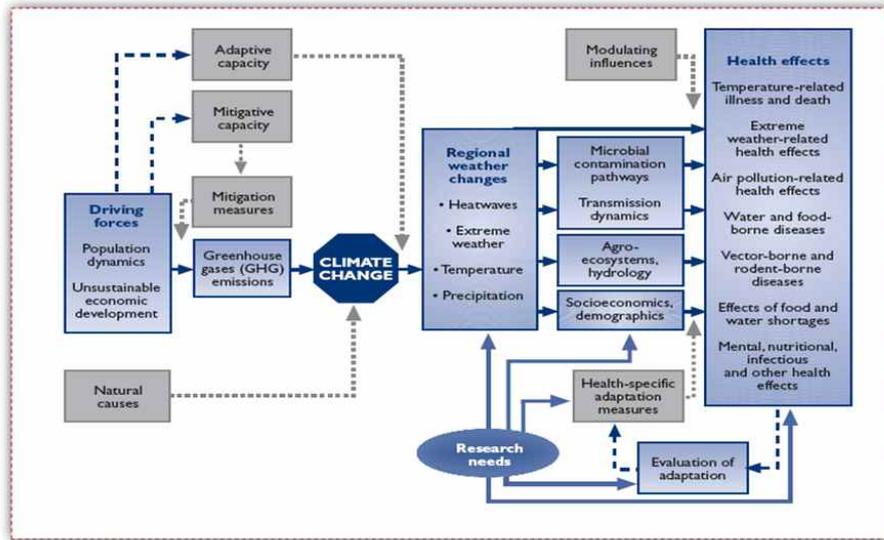
되는 다양한 모수들(표준 기대여명, 중증도, 가중치 등)에 의해서 그 추정 값에 차이를 보일 수 있다. 넷째, EBoD의 평가결과는 환경 위험요인들의 상호작용으로 인한 영향을 고려할 수 없으며 더불어 특정 환경 위험요인으로 인한 영향을 고려할 수 없다. 마지막으로, EBoD 추정값은 사회적, 문화적인 영향으로 나타나는 것을 측정할 없는 제한점이 있다. 이러한 제한점에도 불구하고 EBoD 평가는 환경 위험요인으로 인한 질병부담에 대한 국제적, 지역적, 시계열적 비교 그리고 환경 위험요인에 대한 우선순위 결정 등에서 그 효용성이 높다.

3. 기후변화로 인한 질병부담

EBoD 평가에서 기후변화는 위험인자 중의 하나이다. 기후변화로 인한 EBoD 평가 방법론은 앞에서 언급한 EBoD 평가 방법론과 비슷하나 기후변화로 인한 질병발생 모형을 사용하여 예측할 수 있다는 측면에서 다르다.

일반적으로 기후변화로 인한 EBoD 평가를 수행하는 단계는 크게 4가지이다. 1단계는 기후변화로 인해 발생하는 질병을 분류하는 것이다. 기후변화로 인한 EBoD 평가는 현존하는 모든 질환의 부담을 측정하는 방법론이 아닌, 오직 기후변화와 관련된 질환들을 질병부담으로 측정하는 것이므로 이들 질병들을 분류하는 과정은 필수적이다. 2단계는 기후변화로 인한 환경성 질환에 대한 사망률, 발생률을 예측하거나 자료를 구축하고 기여위험도를 설정하는 것이다. 이 단계에서 앞의 EBoD 방법론과 차이점이 있다. 그것은 해당 질병의 사망률과 발생률을 구하는 방법이 2가지라는 점이다. 한 가지 방법은 발생률 예측을 위해 비모수적인 예측 모형인 Poisson 분포의 일반화선형모형을 사용하여 기후변화 관련 질환들의 사망률, 발생률과 역치온도를 추정하는 것이다. 다른 하나의 방법은 역치온도는 기존 문헌 고찰을 통해, 발생률은 자료원을 통해 구득하는 것이다. 3단계는 기후변화에 기인한 여러 질병들의 부담을 합하여 최종 환경성 위험요인의 질병부담을 산출하는 것이다. 4단계는 다양한 기후변화 시나리오를 이용하여 예측모형을 개발하고 미래의 기후변화로 인한 질병부담을 추정하는 것이다.

환경부에서는 2010년에 기후변화에 의한 질병부하평가 및 예측기법 개발 연구를 수행하였다(환경부 2010). 이 연구에서는 조작적 정의로서 기후변화관련 위험인자를 결정하였는데, 다음 <그림 7>과 같다. 기후변화로 인해 직접적으로 영향을 받는 부분은 지역적인 날씨의 변화가 될 것이며, 이는 폭염 및 폭서 등의 극한 기후, 기온의 상승, 강수량의 변화 등의 다양한 날씨 변화로 나타난다. 기온상승으로 인하여 다양한 심뇌혈관계 질환이 발생하게 될 뿐 아니라 다양한 전염병 질환의 창궐로도 이어지게 된다. 또한 기온상승은 대기 내 오존농도를 상승시켜 COPD(Chronic Obstructive Pulmonary Disease : 만성폐쇄성폐질환)나 천식 등과 같은 다양한 호흡기계 질환의 발생으로 연결되기도 한다. 또한 자연재해의 발생이 증가함에 따라 재해로 인한 다양한 외상 및 신경정신과적 질병의 발생에 영향을 미치게 된다.



<그림 7> 위험인자와 질병간 관련성(WHO, 2003)

최종 환경부의 2010년 연구에서 도출된 기후변화 관련한 2008년 기준의 EBoD 평가 결과는 아래의 <표 1>와 같다.

<표 1> 기후변화에 따른 질병부담(단위: DALY/1000명)

위험인자	질병	성별		전체
		여자	남자	
Heatwave (폭염)	Rheumatic(류머티즘)	0.10	0.04	0.07
	Hypertensive(고혈압)	1.81	1.83	1.82
	Ischemic(허혈성 뇌졸중)	1.27	1.85	1.56
	CVD(심혈관계 질환)	1.52	1.59	1.56
	Inflammatory(염증성)	0.15	0.21	0.18
Temperature (기온상승)	Diarrhea(설사)	0.04	0.04	0.00
	Malaria(말라리아)	0.00	0.01	0.01
	Dengue(뎅기열)	0.00	0.00	0.00
	Tsutsugamushi(쯔쯔가무시증)	0.05	0.04	0.05
Ozone density (오존)	COPD(만성폐쇄성폐질환)	1.14	1.17	1.15
	Asthma(천식)	0.52	0.36	0.44
Disaster (재해)	PTSD(외상 후 스트레스 장애)	0.00	0.00	0.00
	Injury(손상)	0.01	0.02	0.03
Total		6.58	7.16	6.85

이 연구를 통해 도출된 DALY의 값은 인구 1000명당 DALY값으로 6.85로 평가되었다. 질병부담에 가장 큰 비중을 차지하는 위험인자는 폭염으로 남녀 합산한 DALY 값은 5.17(DALY/1000명)으로 평가되었다. 그 다음 값을 차지하는 것이 오존농도에 따른 호흡기계 질환의 질병부담으로 그 값은 1.59(DALY/1000명)이다. 폭염과 관련된 질환 중 고혈압성 심장질환이 1.82(DALY/1000명)의 값을 차지하였으며 남녀의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나

남자의 경우 고혈압성 심장질환보다는 허혈성 심장질환에 의한 질병부담이 더 높아 주의가 요구되는 질환으로 판단할 수 있다.

성별에 따른 DALY 평가결과를 보면, 기후변화로 인한 질병부담은 남자는 7.16(DALY/1000명), 여자는 6.58(DALY/1000명)으로 측정되었다. 폭염에 따른 질병부담의 남녀 간 차이의 경우 오히려 남성이 취약한 성별로 평가되었으나, 오존농도 증가에 따른 호흡기계 질환에 보다 취약한 성별은 여성으로 남성에 비해 질병부담이 높은 것으로 평가되었다.

기후변화의 위험요인과 관련된 질환 중 폭염으로 인한 고혈압성 질환 및 뇌혈관성 질환, 기온상승과 관련된 Dengue, 오존과 관련된 COPD 그리고 재해와 관련된 손상의 질병부담이 다른 질환에 비해 높은 것으로 나타났다.

<보충자료>

환경부 2010년의 연구보고서는 2008년 기준의 기후변화로 인한 질병부담이다. 미래 기후변화로 인한 질병부담 평가에 대한 결과는 어떻게 되는가?

환경부 2010년 보고서에서 향후 기후변화의 예측 값에 따라 기여위험도를 적용하여 해당 기후정보에 따른 질병부담을 평가한 결과는 아래 <그림 9>와 같다.



<그림 8> 기후변화에 따른 질병부담 변화 양상(환경부, 2010)

기후변화에 따른 위험인자로 정하였던 폭염, 기온상승, 오존농도 상승, 재해 발생 증가에 따른 질병부담은 2008년 6.85(DALY/1000명)을 시작으로 하여 2100년에 약 2배인 11.48까지 증가할 것으로 평가되었다. 이중 가장 많은 부담을 차지하는 위험인자는 폭염으로 이는 전체 질병부담의 70%에 달하는 비중을 차지하는 질환이었다. 그 다음은 오존농도에 따른 호흡기계 질환의 질병부담으로 나머지 약 30% 가량을 차지할 것으로 평가되었다.

참고문헌

주교재: WHO (2003), Climate change and human health: Risk and Response.

참고문헌

WHO (2008), Environmental Burden of Disease Series, World Health Organization.

WHO (2007), Country profiles of environmental burden of disease, World Health Organization.

WHO (2009), Country profiles of environmental burden of disease, World Health Organization.

THL (2011), European Perspectives on Environmental Burden of Disease: Estimates for Nine Stressors in Six European Countries.

OECD (2011), Towards Green Growth: Monitoring Progress.

WHO (2003), Climate change and human health: Risk and Response

Knol AB et al.,(2009) Dealing with uncertainties in environmental burden of disease assessment.

Environmental Health 8:21.

환경부 (2010), 기후변화에 의한 질병부하평가 및 예측기법 개발 연구.