

장기 배출량 자료와 다매체 환경모델을 이용한 국내 대기 중 PCB 농도 및 패턴 예측

Prediction of Concentrations and Congener Patterns of Polychlorinated Biphenyls in Korea Using Historical Emission Data and a Multimedia Environmental Model

최 성 득*

토론토대학교 물리·환경과학과

(2007년 11월 28일 접수, 2008년 1월 25일 채택)

Sung-Deuk Choi*

*Department of Physical and Environmental Sciences,
University of Toronto Scarborough*

(Received 28 November 2007, accepted 25 January 2008)

Abstract

Historical emission data for 11 polychlorinated biphenyls (PCBs) and a regional multimedia environmental model, CoZMo-POP 2, were used to predict air concentrations and congener patterns in Korea. The total emission value for South Korea was allocated to sub-provinces and cities based on their population. The spatial distribution of PCB emissions was generally correlated with that of measured atmospheric levels, suggesting that population could be a good surrogate for the intensity of PCB emission in Korea. The simulated time trends of air concentrations well reflected those of emission with a peak in the mid-1970s and insignificant levels in the 2030s. The model predicted that the contribution of volatile PCBs had increased after emission reduction in the 1970s. This trend would continue until the early 2030s. The measured and modeled PCB levels in the 2000s were in an agreement of an order of magnitude, and their congener patterns were very similar. Consequently, despite of high uncertainty for emission estimates, the emission data for Korea used in this study is considered to be reliable. The results of this study could be compared with simulation data based on a new emission inventory to be developed by measurements in the near future.

Key words : PCBs, Emission inventory, Multimedia environmental model, CoZMo-POP

1. 서 론

폴리염화비페닐(polychlorinated biphenyls: PCBs)은 스톡홀름협약에 의해 규제되고 있는 대표적인 잔

*Corresponding author.
Tel : +1-416-953-2679, E-mail : sd.choi@utoronto.ca

류성 유기오염물질(persistent organic pollutants: POPs)이다. PCBs는 두 개의 벤젠고리에 염소가 한 개에서 최대 10개까지 결합한 구조로서 전체 209개의 화합물(congener)이 있다. PCBs는 절연성이 뛰어나고 열에 안정하므로 절연유, 페인트, 전선피복 등 다양한 상업적 용도로 사용되었으나, 먹이사슬을 통한 생물농축과 생체독성이 알려지면서 1970~80년대에 전 세계적으로 사용이 금지되었다. 그러나 PCBs는 제품과 폐기물 등에서 지속적으로 휘발되고 소각 등을 통해 비의도적으로 합성되어 해수와 대기를 통해 장거리 이동을 한다(Wania and Mackay, 1996). 따라서 청정지역인 극지를 포함한 지구상 대부분의 지역에서 검출된다(최성득과 장윤석, 2007; 최성득 등, 2007).

국내에서는 1970년대 말부터 PCBs 함유 제품의 사용이 금지되었으며, 1996년에는 유해화학물질관리법을 통해 PCBs 및 50 ppm 이상의 PCBs를 함유한 화학물질의 제조, 수입, 사용이 금지되었다. 또한 2005년 스톡홀름 협약이 발효되고 2007년에 우리나라가 정식 가입하면서 PCBs를 포함한 POPs에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히, 스톡홀름협약 가입 후 2년 이내에 국가이행계획서를 작성할 의무가 있으며, 환경부에서는 이에 적극적으로 대응하기 위해서 2005년부터 2015년까지 10년 계획으로 PCBs 연구사업을 추진하고 있다. 지금까지 추진된 공공기반기술과제로는 (1) 변압기 절연유 교체 및 재활용 방안, (2) PCBs 함유 폐기물의 적정관리를 위한 규제체계, (3) PCBs 함유 제품·폐기물의 처리기술 평가, (4) 변압기 절연유 중 PCBs 오염원 추적, (5) 폐변압기 및 콘덴서 안전관리체계, (6) 저농도 PCBs 오염 폐기물에 대한 적정 소각조건 연구가 있다. 또한 2007년 11월부터는 (7) PCBs 함유 제품·폐기물 배출량 산정기법 개발, (8) PCBs 오염 대형변압기의 현장 해체 안전관리 지침 연구들이 추진되고 있다.

PCBs는 대부분 대기 중으로 배출되어 이동, 분해, 침적되므로 PCBs의 환경거동을 이해하기 위해서는 배출량 산정, 대기 모니터링 및 모델링 등이 중요하다(Wania and Su, 2004). PCBs를 포함한 대부분의 POPs는 일반대기오염물질과는 달리 다양한 환경매체에 장기간 축적되므로 과거 배출량이 현재의 오염수준에 지속적인 영향을 줄 수 있다(Gouin and Wania, 2007). 특히 고염화 PCBs는 분해속도가 느리므로 이들의 거동을 평가하기 위해서는 지난 수십 년 동안

의 배출량 추세를 파악할 필요가 있다. 이를 바탕으로 대기 모니터링과 모델링 연구를 수행함으로써 PCBs 배출 저감효과를 확인하고 위해성 평가의 기초자료로 활용할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 장기 배출량 자료와 다매체 환경모델을 이용하여 국내 대기 중 PCBs 농도와 패턴을 예측하였으며, 추가 연구사항에 대하여 논의하였다.

2. 연구 방법

2.1 다매체 환경모델

본 연구에서는 다매체 환경모델인 CoZMo-POP 2를 사용하였다. 이 모델은 이전 버전인 CoZMo-POP (Wania *et al.*, 2000)을 업데이트한 것으로서 기본적인 모델 이론은 동일하지만 공간규모의 선택이나 출력양식이 세분화된 것이 특징이다(Wania *et al.*, 2006). 이 모델은 프로그램 소스를 변경할 필요 없이 관심지역의 환경인자를 윈도우 입력창에서 변경할 수 있는 장점이 있다. 따라서 프로그래밍 언어에 익숙하지 않더라도 쉽게 모델을 사용할 수 있다. 모델 대상지역은 기본적으로 육상환경이며, 기수역, 연근해, 원양을 추가할 수 있기 때문에 본 모델은 전 세계 다양한 지역에 적용될 수 있는 장점이 있다. 이 모델의 설치 프로그램은 토론토대학교 폴리·환경과학과의 Wania 그룹 웹사이트를 통해 무료로 내려받을 수 있다(<http://www.utoronto.ca/~wania/downloads2.html>).

다매체 환경모델은 모든 환경매체(대기, 토양, 담수, 해수, 퇴적물, 산림 등)에서의 화학물질 거동(축적, 분해, 이동)을 동시에 예측한다. 본 논문에서는 대기농도만 제시했으나, 실제로는 모든 환경매체에서의 PCBs 농도, 축적량, 분해량, 매체 간 이동량 등이 예측되었다.

2.2 환경인자 입력자료

CoZMo-POP 2는 윈도우용 프로그램으로서 지역별 기상자료와 환경매체 자료를 데이터베이스 화일에 저장하여 각 지역의 환경매체 특성에 따른 모델링을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 기상청에서 제공하는 전국 67개 지점의 월 평년(30년 평균) 기상자료(온도, 풍속, 강수량)를 사용하였으며, 대기 중 월 평균 OH 농도는 CoZMo-POP 2의 기본값을 사용하였다(표 1). 육지면적, 토지 이용형태, 담수와 기수역

Table 1. Meteorological parameters of South Korea used in CoZMo-POP 2.

Month	Air temperature (°C)	Terrestrial temperature (°C)	Wind speed (m/s)	Precipitation (mm)	OH concentration (molecules/cm ²)
Jan.	-1.1	0.6	2.4	32	120000
Feb.	0.7	2.0	2.5	37	175000
Mar.	5.5	6.8	2.4	60	250000
Apr.	11.9	13.5	2.5	93	400000
May	16.8	19.4	2.2	103	550000
Jun.	20.9	23.7	1.9	169	650000
Jul.	24.3	26.5	1.9	262	650000
Aug.	24.9	27.5	1.8	262	550000
Sep.	20.1	22.7	1.7	149	400000
Oct.	14.0	16.3	1.8	56	250000
Nov.	7.4	8.8	2.1	52	175000
Dec.	1.4	2.8	2.2	27	120000

Table 2. Hydrology parameters of South Korea used in CoZMo-POP 2.

Parameter	Value
Surface area of drainage basin (m ²)	9.95 × 10 ¹⁰
Fraction covered by lakes and rivers	0.014
Fraction covered by uncultivated soils	0.169
Surface area of estuary (m ²)	2.98 × 10 ⁹
Surface area of coastal basin (m ²)	9.56 × 10 ¹⁰
Average depth of freshwater (m)	1
Average depth of estuary (m)	10
Average depth of coastal basin (m)	163
Rain rate (cm/yr)	130.2
Evaporation fraction of input from freshwater from forest soil	0.2
from agricultural and uncultivated soil	0.25
from coniferous canopy	0.6
from deciduous canopy	0.4

Table 3. Forest parameters of South Korea used in CoZMo-POP 2.

Parameter	Value	
Fraction of drainage basin covered by forest	0.63	
Fraction of forest area covered by coniferous trees	0.58	
	Coniferous	Deciduous
Canopy volume per ground area (m ³ /m ²)	0.00677	0.00694
Factor M in partitioning relationship for canopies (K _{FA} = M · K _{OA} ^N)	38	14
Exponent N in partitioning relationship for canopies	0.69	0.76
Dry gaseous deposition velocity (m/h)	42.1	130
Dry particulate deposition velocity (m/h)	3.4	27
Average needle age (year)	5	--
Fraction of leaves which stays on trees during winter	-	0.1
Deciduous canopy development (JD)		
Start of growth	90	
End of growth	180	
Start of falling	270	
End of falling	330	

의 면적, 산림인자 등은 통계청, 국가수자원관리 종합 정보시스템, 산림청 등의 웹사이트를 통해 입수하였다(표 2, 3). 기본적인 물리인자 이외의 매체별 강수량 증발비율, 분배계수, 침적속도 등은 CoZMo-POP 2의 기본값을 사용하였다. 본 연구의 모델 영역(제주도 포함)은 그림 1에 붉은 실선으로 나타냈으며 전체 면적은 198,000 km²이다.

2.3 배출량 입력자료

국내 PCBs 배출량 인벤토리는 아직 작성되지 않았으므로, 노르웨이 대기연구소에서 작성한 전 세계 배출량 자료를 사용하였다. 이 자료는 PCBs 제조, 수출입, 소비, 생산, 수입 금지 등의 기초자료에 근거한 물질수지 모델과 배출계수를 이용하여 1930년부터

2100년까지 국가별로 계산되었다(Brevik *et al.*, 2007, 2002a, b). PCBs 배출원은 크게 세 가지 범주로 나뉜다: (1) PCB 함유 제품(55%), (2) 폐기물 처리(매립, 야외소각, 소각장 연소, 분쇄: 33%), (3) 사고로 인한 누출(토양으로의 유출, 화재: 12%). 이 중에서 가장 큰 비중을 차지하는 하위 범주의 오염원은 플라스틱

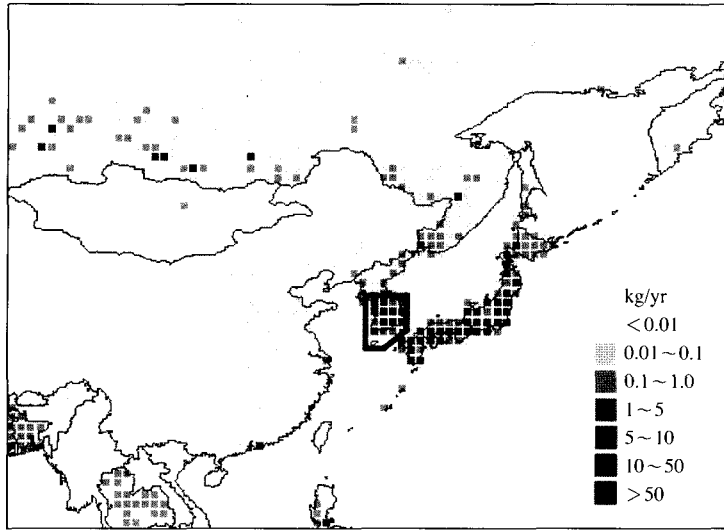


Fig. 1. Total emission of 22 PCBs in Asia for the year 2005. The mid-emission scenario by Breivik *et al.* (2007) was used.

가소제, 페인트, 복사용지, 윤활유 등의 소모성 제품 (43%)과 야외소각(32%)이다(Breivik *et al.*, 2007).

그림 1은 2005년 아시아에서 배출된 22개 PCBs (5, 8, 18, 28, 31, 52, 70, 90, 101, 105, 110, 118, 123, 132, 138, 149, 153, 158, 160, 180, 194, 199) 총량의 지리적 분포를 나타낸다. 이 배출량 지도는 국가별로 산정한 배출량을 인구에 비례하여 1° × 1° 해상도 격자에 할당한 것이다. 따라서 각 국가 내 배출량의 지리적 분포는 인구의 분포와 동일하다. 한국, 중국, 일본의 2005년 총 배출량은 210, 92, 654 kg이므로 단위면적당 배출량은 우리나라가 가장 크다. 이러한 국가별 배출량 규모를 고려할 때, 추후 연구에서는 장거리 이동의 영향을 고려해야 할 것이다. 본 연구에서는 배출량이 산정된 22개 PCBs 화합물 중에서 이전 다매체 모델링 연구에서 사용된 11개 화합물(PCB-8, 28, 31, 52, 101, 105, 118, 138, 153, 180, 194)을 선택하였다. 이 화합물들의 물리화학적 특성은 다음 참고문헌에 제시되어 있다(Wania and Su, 2004).

(passive air sampler: PAS) 모니터링 결과(Jaward *et al.*, 2005)를 그림 2에 나타내었다. 전국 총 배출량을 지역별 인구에 비례하여 시군 단위로 할당했기 때문에 인구가 많은 지역일수록 PCBs 배출량이 큰 결과를 보인다. 인구가 밀집한 수도권, 광주, 대전, 대구, 울산, 부산광역시에서 많은 양의 PCBs가 배출되는 것으로 예상된다. 이들 대도시의 2004년 배출량은 인구가 가장 적은 울산을 제외하고 모두 10 kg 이상으로서, 국내에서는 PCBs 사용이 전면 금지되었으나 여전히 많은 양이 배출되는 것으로 보인다.

위에서 언급한 대도시의 총 배출량(kg)과 단위면적 당 배출량(kg/m²)은 높은 양의 상관관계가 있으므로($R^2=0.97$), 지역 넓이와 크게 상관없이 인구가 많은 지역일수록 PCBs 배출량이 많을 것으로 예상된다. 일반적으로 PCBs 농도는 다른 POPs와 비교하여 인구가 많은 산업화 지역에서 특히 높은 것으로 알려졌다. 따라서 국내 지역별 PCBs 배출량과 대기 농도의 상관관계를 살펴볼 필요가 있다. 그러나 지금까지 국내에서는 소수 지점의 대기 중 PCBs 농도가 보고되었으며, 이들 대부분은 고용량 대기채취기(high volume air sampler: HiVol)를 이용하여 서로 다른 기간에 측정된 자료들이다. 그러므로 이러한 연구결과와 배출량 분포를 직접적으로 비교하기에는 문제가 있다. 본 연구에서는 영국 랭커스터대학교(Lancaster

3. 결과 및 토의

3.1 배출량과 대기농도의 상관성

2004년 전국 PCBs 배출량 분포와 수동대기채취기

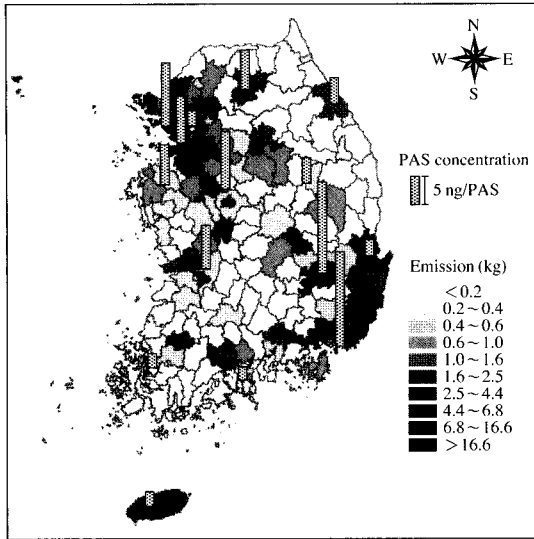


Fig. 2. Total 22 PCB emissions from sub-provinces and cities in South Korea for the year 2004 and amounts of 31 PCBs sequestered by passive air samplers from September 2004 to November 2004 (Jaward *et al.*, 2005).

University) 연구진이 국내 15개 지점(서울, 인천, 수원, 춘천, 강릉, 당진, 진천, 익산, 무안, 여수, 부산, 대구, 포항, 영주, 제주)에 56일 동안(2004년 9월 21일 ~ 11월 16일) PAS로 동시 측정된 자료를 이용하였다(Jaward *et al.*, 2005). 이 자료는 PAS에 채취된 개별 PCBs의 양(PAS 농도: ng/PAS)으로서, 그림 2에는 31개 PCBs (18, 22, 28, 31, 44, 49, 52, 60/56, 70, 74, 87, 90/101, 95, 99, 105, 110, 118, 132, 138, 141, 149, 151, 153, 158, 170, 174, 180, 183, 187)의 합을 나타내었다. PAS는 주로 기체상 PCBs를 채취하므로, PAS 농도로부터 환산된 대기농도(pg/m^3)는 실제 총 농도(기체상+입자상)와는 차이가 있다. 그러나 대기에서 고농도로 검출되는 저염화 화합물은 주로 기체상에 존재하므로 PAS 농도는 비교적 총 농도를 잘 반영한다. 또한 기체/입자 분배모델을 이용하여 PAS 결과로부터 총 농도를 산정하는 방법도 제시되었다(백송이 등, 2007).

그림 3은 지역별 배출량과 PAS 농도의 상관성을 보여주는 그림이다. 농도수준의 직접적인 비교를 위해 16개 PCBs (18, 28, 31, 52, 70, 90, 101, 105, 110,

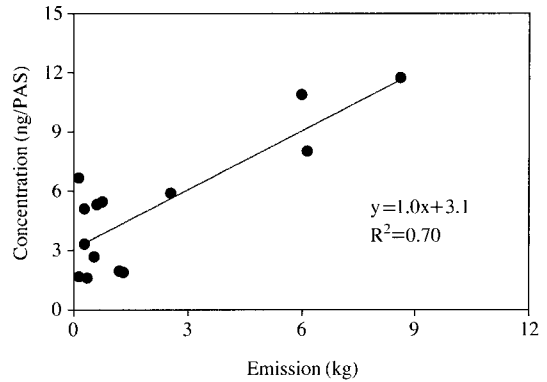


Fig. 3. Comparison between measured $\Sigma_{16}\text{PCB}$ levels (Jaward *et al.*, 2005) and emission estimates for sub-provinces and cities in South Korea. Data for Seoul was not included; see text for details.

118, 132, 138, 149, 153, 158, 180) 총량을 사용하였다. 서울 시료에서는 상대적으로 낮은 수준의 PCBs가 검출되었고, 폴리브롬화비페닐에테르(polybrominated diphenyl ethers: PBDEs)는 전혀 검출되지 않았다. 이 시료는 강남지역에 설치되었으므로 가장 오염도가 심한 지역에 설치된 것으로 보이나 실제 PAS에 채취된 양은 무안, 제주 등 비교적 청정한 지역의 수준이었다. 따라서 시료채취나 기기분석 상의 오류가 있었던 것으로 판단되어 서울 자료는 사용하지 않았다. 본 연구에서 산정한 PCBs 배출량은 불확도가 크며, PAS는 지역별로 한 개 지점에 설치되었으므로(Jaward *et al.*, 2005) 지역별 오염수준을 대표하기에는 무리가 있는 것이 사실이다. 그러나 추세선의 R^2 은 0.70으로서 대체로 배출이 많은 지역일수록 대기 중 농도가 높은 경향을 보인다. 물론 그림 3 좌측 하단에 나타난 배출량이 적은 지역에서는 인구를 기준으로 PCBs 배출량을 산정하는 기법의 신뢰성이 높지 않지만, 전반적으로 도시와 시골의 농도구배(concentration gradient)를 확인하는 데는 유용할 것이다. 2005년 하반기부터 포항공과대학교 연구진은 XAD-resin을 장착한 PAS를 국내 5개 지점(서울, 대전, 포항, 부산, 제주)에 설치하여 1년 주기로 PCBs를 비롯한 다양한 POPs를 모니터링하고 있다. 앞으로 이 모니터링 결과와 PCBs 배출량 산정결과를 비교하는 것도 흥미로운 연구가 될 것이다.

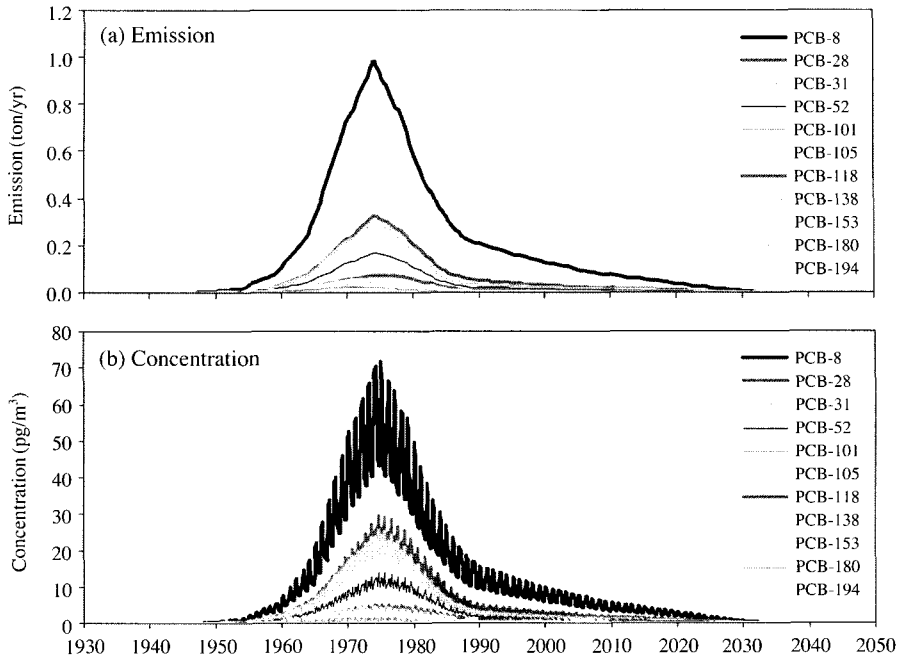


Fig. 4. Historical PCB emissions in South Korea estimated by Breivik *et al.* (2007) and simulated concentrations for 11 selected PCB congeners using CoZMo-POP 2.

3. 2 모델을 이용한 대기농도 예측

그림 4(a)는 Breivik *et al.* (2007)이 제시한 국내 PCBs 배출량 추세이며, 그림 4(b)는 CoZMo-POP 2를 이용하여 산출한 대기농도 추세이다. 본 연구에서는 장거리 이동의 영향이 없다고 가정하고 국내 배출만 고려했기 때문에, 모든 PCBs 농도가 배출량 증가에 따라 즉각적으로 반응하는 것을 볼 수 있다. 그림 4(b)에서 PCBs 농도의 상하 진폭은 계절에 따른 기온의 변화에서 기인한 것이다. PCB-8, -28과 같이 휘발성이 강한 화합물의 진폭이 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다. 1960년대 중반 이후 PCBs 배출량과 대기농도가 급격히 증가했으며, 1970년대 중반을 정점으로 1980년대 말까지 빠르게 감소하다가 1990년대 이후에는 비교적 천천히 감소하고 있다. 이러한 감소추세는 2030년까지 지속되어 1950년대 수준으로 회복될 것으로 예측된다. 그러나 상당량의 고염화 PCBs는 토양과 퇴적물에 축적되어 장기 오염을 유발할 것으로 예상되므로, 대기농도 감소와는 별개로 다양한 환경매체와 생체시료의 모니터링 및 위해도 평가는 2020년대 이후에도 지속되어야 할 것이다.

특히 변압기 절연유 등의 오염을 해결한 이후에는 비의도적 배출(연료 연소, 소각, 철강공정 등)의 비중이 증가할 것이므로(김경미 등, 2004), 이에 대한 지속적인 모니터링과 배출저감 노력이 중요하다.

한편, 장기 배출량과 농도 추세를 보다 자세히 파악하기 위하여, 총 배출량과 농도에 대한 개별 PCB의 비율을 그림 5에 나타내었다. 전반적으로 개별 PCB 배출량과 농도 비율은 시간에 따라 비슷한 변화를 보인다. 휘발성이 강한 PCB-8과 PCB-28의 배출량과 농도 비율은 시간이 지남에 따라 증가하고, 고염화 화합물의 비율은 감소하는 경향을 보인다. 이 결과는 PCBs 수입이 전면 금지된 1980년대 이후로 대기로 배출되는 PCBs 대부분은 휘발성이 강한 저염화 화합물이라는 것을 의미한다. 따라서 2030년까지는 환경대기 시료에서는 저염화 화합물의 비율이 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 그러나 그림 5를 자세히 살펴보면 배출량과 농도 비율이 다소 다른 경향을 보인다. 예를 들어, 2030년에 배출되는 전체 PCBs에 대한 PCB-8의 비율은 69%이지만, 농도 비율은 55%로서 모든 연도에 걸쳐서 PCB-8의 농도

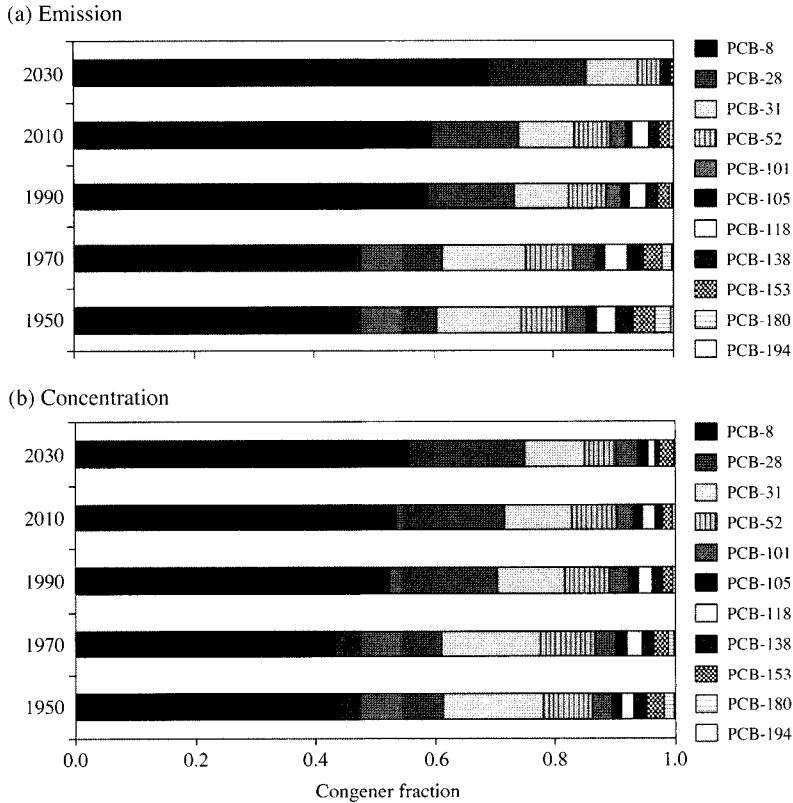


Fig. 5. Congener fractions of each PCB to the total emissions and concentrations for 5 selected years (1950, 1970, 1990, 2010, 2030).

비율이 배출량 비율보다 낮았다. 반면에 2030년에는 PCB-101 이상의 고염화 화합물의 배출량 비율은 2% 였으나 농도 비율은 10%였다. 즉, 고염화 화합물의 배출량이 크게 감소함에도 불구하고 농도에서 차지 하는 비율은 비교적 일정수준으로 유지될 것임을 나타낸다. 이 결과는 PCB congener와 OH 라디칼과의 반응상수로 설명할 수 있다(Wania and Su, 2004). 고염화 화합물일수록 대기에서 분해속도가 느리므로, 비교적 장기간 대기 중에 머무를 수 있기 때문에 새롭게 배출되지 않더라도 농도 비율이 어느 정도 유지되는 것으로 해석된다. 또한 배출량이 감소할수록 대기-지표 교환(air-surface exchange)으로 인해 지표 환경매체가 대기 중 고염화 화합물의 소스 역할을 할 가능성이 있다. 이러한 경향은 저염화 화합물의 배출이 거의 없어지는 2030년대 이후로 심화되어, 결국에는 대기 중에서 검출되는 PCBs 화합물 대부

분은 고염화 화합물이 차지할 것으로 예상된다.

3.3 실측자료와의 비교

국내에서는 2000년대부터 환경대기 중 PCBs에 관한 연구들이 꾸준히 진행되고 있다(Choi *et al.*, 2008; 백송이 등, 2007; Lammel *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2006; 김경수 등, 2005; Yeo and Chun, 2005; Yeo *et al.*, 2004, 2003a, b). 이들 연구 중에서 각 PCB congener 농도 (기체상+입자상), 시료채취 지점, 기간이 명시된 논문(Lammel *et al.*, 2007; Yeo *et al.*, 2004, 2003a)의 자료와 본 연구의 모델링 결과를 비교하였다. 기존 연구들과 본 연구에서 공통적으로 분석한 9개 PCBs의 개별 농도와 전체 농도를 표 4에 나타내었다. 측정 농도는 서울(42.17 pg/m³) > 안성(평균 21.21 pg/m³) > 제주도 고산(3.50 pg/m³) 순서로서 대도시 > 농촌 > 배경지역의 농도구배를 보였다. 서울과 안성의 농도

Table 4. Concentrations of selected PCB congeners modeled in this study and measured in previous studies (pg/m³).

Site	Period	PCB-28	PCB-52	PCB-101	PCB-105	PCB-118	PCB-138	PCB-153	PCB-180	PCB-194	Sum	Reference
South Korea	Year 2000	2.60	1.04	0.43	0.19	0.31	0.19	0.24	0.05	0.01	5.05	This study
Seoul (urban)	Jul. 1999~ Jan. 2000	14.34	7.90	10.74		2.82	2.11	3.26	1.00		42.17	Yeo <i>et al.</i> , 2004
Anseong (rural)	Jul. 1999~ Jan. 2000	8.39	2.00	4.37		0.80		0.55	0.19		16.30	Yeo <i>et al.</i> , 2004
Anseong (rural)	Sep. 2001~ Jul. 2002	12.23	6.14	3.66	0.99		1.05	1.18	0.54	0.34	26.13	Yeo <i>et al.</i> , 2003a
Gosan (remote)	Jun. 2003	1.67	0.87	0.28	0.08	0.21	0.17	0.16	0.06		3.50	Lammel <i>et al.</i> , 2007

와 비교하기 위하여 모델 농도는 2000년 결과를 사용하였다. 모델 농도는 5.05 pg/m³로서 고산보다는 높지만 서울과 안성보다는 각각 8배와 4배 낮은 값이다. 이와 같이 모델 농도가 낮게 나온 이유로 크게 세 가지를 고려할 수 있다. 첫째, 본 연구에서는 Breivik *et al.* (2007)이 보고한 세 가지 배출량 시나리오 (low, mid, high) 중에서 중간 배출량을 사용하였다. 따라서 이 시나리오가 실제 PCBs 배출량보다 과소 평가되었을 가능성이 있다. 둘째, 모델 영역으로 육지 뿐만 아니라 연근해까지 포함했기 때문에 (특정 지역의 농도가 아니라 모델 영역 전체의 농도이므로) 낮은 농도가 산출된 것으로 보인다. 셋째, 본 연구에서는 장거리 이동에 의한 PCBs 유입을 고려하지 않았으나 실제로는 중국으로부터 상당량이 유입될 것으로 판단된다. 따라서 모델의 정확도를 향상시키기 위해서는 국내 지역별 배출량뿐만 아니라 장거리 이동의 영향에 대한 연구가 필요할 것이다. 이에 대해서는 3.4 추가 연구사항에서 다시 논의하였다.

한편, 측정농도와 모델농도의 congener 비율이 대체로 일치하는 것을 그림 6에서 볼 수 있다. 특히, 모델결과와 고산에서의 측정결과가 상당히 일치하는 것으로 판단할 때, 본 연구의 모델결과가 국내 배경농도 수준과 패턴을 잘 반영한다고 할 수 있다. 서울에서 비교적 고염화 비율이 높은 이유로는 다른 지역보다 상대적으로 고염화물이 많이 첨가된 PCBs 제품을 사용했거나, 휘발보다는 고온의 열공정에서 고염화 PCBs가 많이 배출되었을 가능성을 들 수 있다.

3. 4 추가 연구사항

본 연구 결과의 신뢰성을 검증하기 위해서는 측정

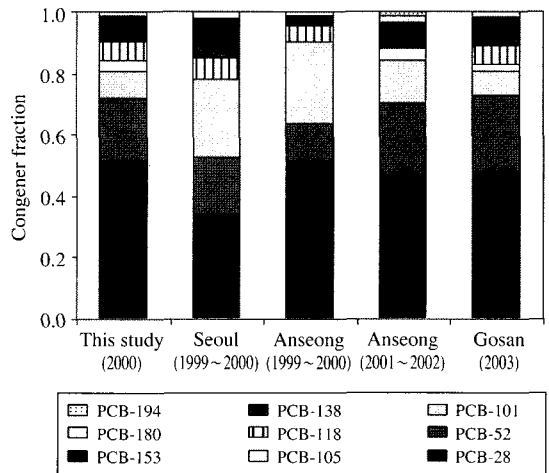


Fig. 6. Congener fractions of 9 PCBs modeled and measured in South Korea.

결과와 모델결과를 비교하고, 민감도 분석을 통해 모델 변수를 보정할 필요가 있다. 다매체 모델링 결과에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 배출량이다. 비록 대기농도와 지역별 배출량의 상관관계가 확인되었으나 (그림 3), 본 연구에서 산정한 지역별 배출량의 불확도는 매우 클 것이다. 따라서 모델의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 실측자료에 근거한 국내 PCBs 배출량 자료가 필요하다. 환경부에서는 2003년 차세대과제 (잔류성 유기오염물질 배출원 조사기법 개발)를 통해 PCBs 배출에 대한 예비 평가를 수행하였다 (김경미 등, 2004). 그러나 이 배출량 평가는 국내 실측자료를 기반으로 하지 않고 외국에서 보고된 배출계수 등을 사용했으므로 불확도 측면에서는 본 연구에서 사용한 자료 (Breivik *et al.*, 2007) 보다 크게 개

선되지 않은 것으로 보인다. 더구나 환경모델의 입력 자료로 활용하기 위해서는 과거의 장기 배출량 자료도 필요하다. 환경부에서는 2007년 하반기부터 PCBs 연구사업을 통해 PCBs 함유 제품·폐기물 배출량 산정기법 개발에 대한 연구를 추진하고 있다. 이 연구는 기존 연구와는 달리, 실측자료를 기반으로 국내 실정에 맞는 배출량 산정법을 개발하는 것이 주요 내용이다. 앞으로 이 연구결과는 환경모델의 입력자료로 사용되어 환경거동 및 위해성 평가에 사용됨은 물론이고, 궁극적으로 관련정책 수립과 스톡홀름협약 이행에 직접적으로 사용될 것으로 기대된다.

또한 국내 배출량 이외에도 중국으로부터의 유입량을 산정할 필요가 있다. 다양한 오염물질이 장거리 이동을 통해 중국에서 국내로 유입된다고 알려져 있지만 POPs의 경우에는 알려진 바가 거의 없다. 따라서 환경부에서 운영 중인 배경측정망에서 POPs에 대한 상시 측정이 이루어질 필요가 있으며, 중장기 오염수준의 지리적 분포를 파악하기 위하여 HiVol 뿐만 아니라 다양한 종류의 PAS를 설치할 필요가 있다(최성득과 장윤석, 2005).

현재 국내에는 전국규모의 다매체 환경모델로서 서울대에서 개발한 KoEFT-PBTs 모델이 있으며(이윤아, 2005), 차세대 핵심환경기술개발사업(2005~2008)을 통해 다매체 모델을 이용한 전국 규모의 환경오염지도 작성 및 오염원 관리시스템이 구축되고 있다. 이러한 모델 시스템에 새롭게 작성될 PCBs 배출량 자료를 입력할 경우, 국내 환경매체 및 오염특성을 고려한 신뢰성 있는 PCBs 거동을 연구할 수 있을 것으로 기대한다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 시군 단위의 지역별 PCBs 배출량을 산정하여 기존에 측정된 환경대기 중 PCBs 수준과 비교하였다. 배출량 산정의 큰 불확도에도 불구하고 지역별 배출량과 대기 오염수준의 상관성을 확인하였다. 그러므로 본 논문에서 제시한 지역별 배출량은 전반적인 오염수준의 지리적 분포를 평가하는 데 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 다매체 환경모델을 이용하여 1930년부터 2050년까지의 대기농도를 산정한 결과, 1970년대 중반에 최고 농도를 기록하였

고, 1990년대까지 급격히 감소하다가 이후로는 천천히 줄어드는 것으로 나타났으며, 2030년대 이후에는 1950년대 수준에 도달할 것으로 예측되었다. 배출량이 감소한 1970년대부터 2030년까지는 대기 중 저염화 PCBs 농도의 비중이 지속적으로 증가할 것으로 보이며, 이후로는 고염화 PCBs가 큰 비중을 차지할 것으로 예상되었다. 모델로 산정한 PCBs 농도는 실측값의 10배 이내에서 비교할 수 있는 수준이었으며, 모델과 실측값의 congener 패턴도 상당히 일치하는 것을 확인하였다. 본 연구의 주요 결과들은 실측 자료를 근거로 새롭게 작성될 배출량 인벤토리와 전국 규모의 다매체 모델링 결과와 비교·평가됨으로써 PCBs 거동 예측의 신뢰도 향상에 도움이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행되었습니다(KRF-2005-214-D00304). PCBs 배출량 자료를 제공해 주신 노르웨이 대기연구소의 Knut Breivik 박사님과 연구 전반에 걸쳐 조언을 해주신 토론토대학교 Frank Wania 교수님께 감사드립니다.

참고 문헌

- 김경미, 조규탁, 이지윤, 이지은, 이동수(2004) 국내 부산물 다염화비페닐(PCBs) 배출량 예비 평가, 환경독성학회지, 19(2), 227-233.
- 김경수, 송병주, 김종국, 김교근(2005) 한국과 일본의 환경대기 중 폴리염화비페닐(PCB)의 농도수준 및 발생원 해석에 관한 연구, 대한환경공학회지, 27(2), 170-176.
- 백송이, 최성득, 장윤석(2007) Passive air sampler (PAS)와 기체/입자 분배모델을 이용한 대기 중 PCB 농도 산정, 한국대기환경학회지, 23(6), 734-743.
- 이윤아(2005) Regional scale assessment of environmental fate and transport of dioxins by a multimedia model (KoEFT-PBTs), 서울대학교 박사학위논문.
- 최성득, 백송이, 장윤석, 윤영준, 박병권, 홍성민(2007) 남극 세종기지에서의 대기 중 PCB 장기 모니터링, Ocean and Polar Research, 29(4), 297-302.

- 최성득, 장윤석 (2005) Passive air sampler를 이용한 잔류성 유기오염물질의 대기 모니터링, 한국대기환경학회지, 21(5), 481-494.
- 최성득, 장윤석 (2007) 잔류성 유기오염물질의 전 지구적 거동: 다매체 환경모델의 결과해석 및 개선방안, 한국해양학회지, 12(1), 24-31.
- Breivik, K., A. Sweetman, J.M. Pacyna, and K.C. Jones (2002a) Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners-a mass balance approach: 1. Global production and consumption, Science of the Total Environment, 290, 181-198.
- Breivik, K., A. Sweetman, J.M. Pacyna, and K.C. Jones (2002b) Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners-a mass balance approach: 2. Emissions, Science of the Total Environment, 290, 199-224.
- Breivik, K., A. Sweetman, J.M. Pacyna, and K.C. Jones (2007) Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners-a mass balance approach: 3. An update, Science of the Total Environment, 377, 296-307.
- Choi, S.-D., S.-Y. Baek, and Y.-S. Chang (2008) Atmospheric levels and distribution of PCBs and PBDEs in the vicinity of an iron and steel making plant, Atmospheric Environment, 42, 2479-2488.
- Gouin, T. and F. Wania (2007) Time trends of arctic contamination in relation to emission history and chemical persistence and partitioning properties, Environmental Science and Technology, 41, 5986-5992.
- Jaward, F.M., G. Zhang, J.J. Nam, A.J. Sweetman, J.P. Obbard, Y. Kobara, and K.C. Jones (2005) Passive air sampling of polychlorinated biphenyls, organochlorine compounds, and polybrominated diphenyl ethers across Asia, Environmental Science and Technology, 39, 8638-8645.
- Lammel, G., Y.-S. Ghim, A. Grados, H. Gao, H. Hühnerfuss, and R. Lohmann (2007) Levels of persistent organic pollutants in air in China and over the Yellow Sea, Atmospheric Environment, 41, 452-464.
- Park, S.S., H.J. Shin, S.M. Yi, and Y.P. Kim (2006) Measurement of atmospheric dry deposition and size distribution of particulate PCBs in 1999 at Seoul, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 22(E1), 35-43.
- Wania, F. and D. Mackay (1996) Tracking the distribution of persistent organic pollutants, Environmental Science and Technology, 30, 390A-397A.
- Wania, F. and Y. Su (2004) Quantifying the global fractionation of polychlorinated biphenyls, Ambio, 33, 161-168.
- Wania, F., K. Breivik, N.J. Persson, and M.S. McLachlan (2006) CoZMo-POP 2-a fugacity-based dynamic multi-compartmental mass balance model of the fate of persistent organic pollutants, Environmental Modelling and Software, 21, 868-884.
- Wania, F., N.J. Persson, A. Di Guardo, and M.S. McLachlan (2000) CoZMo-POP. A fugacity-based multi-compartmental mass balance model of the fate of persistent organic pollutants in the coastal zone, WECC-Report 1/2000.
- Yeo, H.G. and M.Y. Chun (2005) Concentration and seasonal variation of particle PCBs in air, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 21(E1), 13-21.
- Yeo, H.G., M. Choi, M.Y. Chun, and Y. Sunwoo (2003a) Gas /particle concentrations and partitioning of PCBs in the atmosphere of Korea, Atmospheric Environment, 37, 3561-3570.
- Yeo, H.G., M. Choi, M.Y. Chun, and Y. Sunwoo (2003b) Air-soil partitioning of PCBs in rural area, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 19 (E1), 1-9.
- Yeo, H.G., M. Choi, M.Y. Chun, T.W. Kim, K.C. Cho, and Y. Sunwoo (2004) Concentration characteristics of atmospheric PCBs for urban and rural area, Korea, Science of the Total Environment, 324, 261-270.