

## 비메탄계 휘발성유기화합물에 의한 간접 온실효과의 산출

최은화\*

한국환경공단 기후변화대응처

(2011년 9월 16일 접수; 2011년 11월 14일 수정; 2012년 1월 3일 채택)

### Estimation of Indirect Greenhouse Effect by Non-methane Volatile Organic Compounds

Eun-Hwa Choi\*

*Department of Climate Change Action, Korea Environmental Corporation, Incheon 404-708, Korea*

(Manuscript received 16 September, 2011; revised 14 November, 2011; accepted 3 January, 2012)

#### Abstract

Indirect CO<sub>2</sub> effect due to non-methane volatile organic compound (NMVOC) emissions from solvent and product use and fugitive NMVOC emissions from fuels in the Republic of Korea and 13 Annex I countries under United Nations Framework on Climate Change were estimated and the proportions of them to total greenhouse gas (GHG) emissions ranged from 0.092% to 0.45% in 2006. Indirect greenhouse effect (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and O<sub>3</sub>) were estimated at 13 photochemical assessment monitoring sites in the Republic of Korea using concentrations of 8 NMVOCs of which indirect global warming potential (GWP) were available. The contribution of toluene to mixing ratio was highest at 11 sites and however, the contribution of toluene to indirect greenhouse effect was highest at nine sites. In contrast to toluene, the contributions of ethane, butane, and ethylene were enhanced. The indirect greenhouse effects of ethane and propane, of which ozone formation potentials are the lowest and the third lowest respectively among targeted 10 NMVOCs, ranked first and fourth highest respectively. Acetaldehyde has relatively higher maximum incremental reactivity and is classified as probable human carcinogen however, its indirect GWP ranked second lowest.

**Key Words** : Greenhouse gas (GHG); Global warming potentials (GWP); Indirect greenhouse effect; Volatile organic compound (VOC)

#### 1. 서론

대기 중 휘발성유기화합물(VOCs)은 그 자체로서의 독성 및 발암성으로 인하여 인체에 해로운 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 지표면에서 광화학반응에 참여하여 온실가스인 오존을 생성하고 대류권에서 OH 라디칼의 분포를 증가 혹은 감소시키며 메탄

(CH<sub>4</sub>)의 분산을 방해한다. 또한, 대기 중으로 배출된 VOCs는 산화과정을 거쳐 결국 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)로 전환되어 2차적인 지구온난화 가스로서 역할을 한다. 기후 변화에 관한 정부간 위원회(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 제1차 평가보고서에서는 오존과 CO<sub>2</sub>에 대한 비메탄계탄화수소(Non-methane hydrocarbons, NMHCs)의 영향에서 비롯된 간접 지구 온난화 잠재력 지수(Global warming potential, GWP)를 산출하고 간접효과는 모델 의존적이며 수정과 평가가 필요함을 강조하였으나 비교된 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFC, HCFC, CCl<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>, CO, NO<sub>x</sub>,

\*Corresponding author : Eun-Hwa Choi, Department of Climate Change Action, Korea Environmental Corporation, Incheon 404-708, Korea  
Phone: +82-32-590-3444  
E-mail: ehchoi92@gmail.com

NMHCs의 전체 온실효과 중 0.5%를 차지한다고 발표하였다(IPCC, 1990). 2007년 발간된 제4차 IPCC 평가보고서에 따르면 간접 GWP는 비메탄계 휘발성 유기화합물(non-methane volatile organic compounds, NMVOCs)이 배출되는 장소와 시간에 매우 의존적이므로 정책결정에 있어 지구평균 GWP의 유용성이 제한적이라고 할 수 있으나 충분히 계산될 수 있고 기후 변화 완화의 전체 잠재력에 대한 인디케이터로 사용될 수 있다고 설명하였다(IPCC, 2007). 또한, Collins 등(2002)은 10종의 NMVOCs에 대해 대류권 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, 오존에 대한 영향을 고려하여 일부 NMVOC 중에 대한 각각의 간접 GWP를 산출하고 각 종의 배출에 따른 GWP의 100년 평균값으로 3.4를 제시하였다.

유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)은 NMVOCs, SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>를 간접적 온실효과 유발가스로 정의하고 6종의 온실가스(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC, SF<sub>6</sub>)와 함께 국가 인벤토리를 작성하도록 요구하고 있다(UNFCCC, 2006). 국가 온실가스 인벤토리를 위한 수정된 1996 IPCC 가이드라인에서는 직접적인 온실가스인 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O에 대해서는 다양한 온실가스 중 최우선적인 산출을 권고하고, 그 외 NMVOCs를 포함한 CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> 등 간접 온실가스에 대한 배출량 산정방법을 소개하였다(IPCC, 1997). 국가 온실가스 인벤토리를 위한 2006 IPCC 가이드라인 또한 대류권에서 온실가스인 오존 형성에 기여하는 NMVOCs의 배출량을 온실가스 인벤토리에 보고하도록 정하고 있으며 추가적으로 탄소를 포함하는 화합물의 배출로 인해 대기 중으로 유입되는 CO<sub>2</sub>의 양을 산출하여 국가 인벤토리에 포함할 수 있도록 방법론을 제시하고 있다(IPCC, 2006).

2000년에 발표된 IPCC 특별보고서에서 NMVOCs의 전지구적 배출량은 1990년에 140Mt으로, 약 2050년까지 40가지의 시나리오로 분석될 때 25퍼센틸과 75퍼센틸에서 190과 260Mt 사이로 점진적인 증가추세를 나타낼 것으로 예측되었다(IPCC, 2000). 따라서, 인위적 NMVOCs 배출로 인한 간접 온실효과에 대한 비중은 2050년 까지 지속적으로 확대될 것으로 예상되며 우리나라 또한 NMVOCs의 배출량이 꾸준히 증가되고 있는 상황이다(환경부, 2009). 우리나라는 유

엔기후변화협약과 교토의정서 당사국으로서 부문별 온실가스 배출량을 1990년 이후부터 매년 단위로 산정해 왔으며, 1998년과 2003년 2차례에 걸쳐 ‘기후변화협약에 의거한 대한민국 국가보고서’를 UN에 제출한 바 있으나 대부분의 부속서 I 국가와는 달리, IPCC 가이드라인 혹은 IPCC 가이드라인이 참고하도록 권고하는 가이드라인의 카테고리에 따라 간접 온실효과 유발가스인 NMVOCs 배출량이 산정되지 않고 있다. 다만, VOCs 그 자체로서의 독성과 인체에 대한 위험을 고려하여 대기환경보전법에 의거 37종의 휘발성 유기화합물(VOCs)을 규제하고, 유해화학물질관리법에 따라 유해화학물질 환경 배출량 보고 제도(Toxics release inventory, TRI)의 일부로서 VOCs 배출량 정보를 제출받고 있으며, 2010년 1월 1일부터는 발암물질인 벤젠에 대해 대기 중 농도규제(<5 µg/m<sup>3</sup>)가 이루어지고 있다. 그 외, 오존생성에 크게 기여하는 VOCs에 대한 감시 및 관리대책 마련을 위하여 2002년 수도권을 중심으로 한 광화학측정소가 본격 가동된 이래, 2009년 12월 수도권, 부산, 평양만권으로 확대되어 15개 측정소에서 56종의 VOCs를 측정하고 있다.

유엔기후변화협약에 따라 매년 국가 온실가스 인벤토리를 제출하는 부속서 I 국가 중 몇몇 국가는 2006 IPCC 가이드라인에 따라 NMVOCs로 인한 간접 CO<sub>2</sub> 효과를 산출하여 보고하고 있으며 현재 보고가 의무화되지 않은 연료로부터의 탈루성 배출 부문과 같이 간접 CO<sub>2</sub> 효과가 명백히 보고 대상에서 제외되어 있는 부문에 대해 NMVOCs의 간접 CO<sub>2</sub> 배출량 산정의 의무화가 논의되고 있다(Gillenwater, 2008). 따라서, 본 연구에서는 우리나라에서 NMVOCs 배출 비중이 높은 유기용제 사용과 연료로부터의 탈루성 배출원에서 배출되는 NMVOCs로 인한 간접 CO<sub>2</sub> 효과를 산출하여 국가 온실가스 배출량에서 차지하는 비율을 부속서 I 국가와 비교하여 살펴보았으며, 국내 광화학측정망에서 측정된 NMVOCs의 농도값을 이용하여 비교된 13개 측정지점에서 농도와 간접 온실효과(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>)에 대한 중별 기여도 변화를 비교해 봄으로서 건강영향과 오존생성에 미치는 영향 외에 간접 온실효과를 고려한 NMVOCs 관리의 중요성을 고찰해 본다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1. 자료의 수집과 분석

각국별 간접 CO<sub>2</sub> 효과를 산출하기 위하여 2009년에 유엔기후변화협약에 제출한 부속서 I 국가의 온실가스 인벤토리 보고서(National inventory report, NIR)와 공통보고양식(Common reporting format, CRF)의 1990 ~ 2007년 자료 중 1990년과 2006년 온실가스 배출량과 NMVOCs 배출량을 이용하였다(UNFCCC, 2009). 우리나라의 부문별 NMVOCs 자료는 매년 발간되는 대기환경연보를 통해 확보하였으며(환경부, 2009), 국내 온실가스 배출량은 2009년까지 국내 온실가스 인벤토리를 취합해 왔던 에너지경제연구원의 자료를 이용하였다(에너지경제연구원, 2011).

수도권과 부산에서 가동 중인 13개 광화학 오염물질 측정소에서 측정된 56종의 NMVOCs 중 간접 GWP 값이 연구된 ethane, propane, (iso, n)-butane, ethylene, propylene, toluene, isoprene 8종에 대하여 2004년부터 2008년까지 측정된 값을 수집하여 측정지점별 간접 온실효과(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>)를 분석하였다(환경부, 2005; 2006; 2007; 2008; 2009).

### 2.2. 간접 온실효과의 산출

#### 2.2.1. NMVOCs로 인한 간접 CO<sub>2</sub> 효과의 국가간 비교

2006 IPCC 가이드라인, Volume I, 7장 ‘전구체와 간접 배출량’에서는 탄소를 포함하는 화합물의 배출로 인해 대기 중에서 CO<sub>2</sub>로 산화되어 유입되는 양을 산출하여 국가 인벤토리에 포함할 수 있도록 방법론을 제시하고 있다. 에너지 사용 부문의 탈루성 배출 부문을 간접 CO<sub>2</sub> 발생량 산출대상의 한 예로서 제시하였고, 본 연구에서는 ‘유기용제와 제품 이용’ 부문에서 배출되는 NMVOCs와 ‘연료로부터의 탈루성 NMVOCs 배출량’을 이용하여 간접 CO<sub>2</sub> 효과를 산출하였다.

NMVOCs, CH<sub>4</sub>, CO의 대기 중 산화로 인한 간접 CO<sub>2</sub> 효과는 일부 배출원의 경우 IPCC 가이드라인에 따른 국가 온실가스 인벤토리에 포함되는 반면 일부는 명백히 배제된다. 유기용제와 제품 이용 부문은 최근 들어 몇몇 국가가 NMVOCs 배출량을 토대로 간접

CO<sub>2</sub> 효과를 동시에 산출하여 보고하고 있지만 우리나라를 비롯하여 많은 국가들이 간접 CO<sub>2</sub> 효과를 산출하지 않고 있는 상황이므로 NMVOCs 배출량의 상당 부분을 차지하는 유기용제와 제품 사용으로 인한 간접 CO<sub>2</sub> 효과를 산출하여 우리나라와 부속서 I 국가의 결과를 비교하였다.

‘연료의 연소’와 ‘폐기물의 소각’ 카테고리는 소비된 연료통계와 소각된 폐기물 양을 기준으로 물질수지법에 의하여 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정함으로써 NMVOCs, CH<sub>4</sub>, CO의 대기 중 산화를 포함하지만, 석탄광산, 석유와 천연가스 채취, 가공, 저장과 같은 화석연료 생산 과정 중의 탈루성 배출원으로부터 NMVOCs, CH<sub>4</sub>, CO의 형태로 배출되는 탄소는 화석연료 소비에 대한 데이터 수집 전에 발생되기 때문에 연료 소비통계에서 다루어지지 않고 간접 CO<sub>2</sub> 배출량 또한 포함되지 않는다. 따라서 제출된 온실가스 인벤토리 자료를 활용하여 별도의 간접 CO<sub>2</sub> 부하를 산출해 볼 수 있으며, 이렇듯 타 부문과 달리 명백히 제외된 연료로부터의 탈루성 배출로 인한 간접 CO<sub>2</sub> 효과의 경우 향후 유엔기후변화협약으로 보고되는 국가 온실가스 인벤토리 목록에 포함될 수 있음을 고려하여야 한다(Gillenwater, 2008).

2006 IPCC 가이드라인에서 제시한 CH<sub>4</sub>, CO, NMVOCs 각각에 의한 대기 중 CO<sub>2</sub> 유입량 산출방법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} CH_4 \text{로 인한 유입} : Input CO_2 &= Emissions_{CH_4} \times \frac{44}{16} \quad (1) \\ CO \text{로 인한 유입} : Input CO_2 &= Emissions_{CO} \times \frac{44}{28} \\ NMVOCs \text{로 인한 유입} : Input CO_2 &= Emissions_{NMVOC} \times C \times \frac{44}{12} \end{aligned}$$

CH<sub>4</sub>, CO의 산화로 인한 대기 중 CO<sub>2</sub> 양은 개별 기체의 질량단위 배출량에 각 기체의 분자량에 대한 CO<sub>2</sub>의 분자량 비를 곱하여 구한다. 단, NMVOCs는 다양한 분자량과 탄소함량을 갖는 화합물이므로 NMVOCs의 질량단위 배출량에 탄소분율, C를 곱하고 탄소에 대한 CO<sub>2</sub>의 분자량 비를 곱하여 산출한다. C는 NMVOCs 중 질량단위 탄소분율로 2006 IPCC 가이드라인에 주어진 기본값은 0.6이다. 이때, NMVOCs 중 탄소함량은 배출원에 따라 다양하므로 NMVOCs 개별 종에 대한 정보를 바탕으로 한 배출원

별 종별 인벤토리의 구축은 국내 특수성을 반영한 간접 CO<sub>2</sub> 효과를 보다 정확하게 제공할 수 있을 것이나 우리나라의 배출원별 프로파일의 부재로 다른 국가의 기존 연구결과로부터 배출원별 평균 탄소함량을 이용하였다.

유기용제와 제품 사용에서 비롯된 NMVOC 배출량의 비율로 미국은 56.3%, 오스트리아는 60~66%, 헝가리는 76~80%가 제시된 바 있으며(Gillenwater, 2008) 유엔기후변화협약에 제출된 2009년 국가 온실가스 인벤토리 보고서에서 독일은 75%를 사용하였다(UNFCCC, 2009). 그러나 2009년에 유기용제와 제품 사용 부문에서 간접 CO<sub>2</sub> 효과를 산출한 대부분의 국가(프랑스, 그리스, 이탈리아, 루마니아, 스페인) 85%를 사용하여, 본 연구에서는 간접 CO<sub>2</sub> 효과가 산출되지 않은 국가(호주, 캐나다, 일본, 러시아, 영국, 미국)와 우리나라에 대해 다수의 국가가 사용한 85%의 탄소분율을 적용하였다. 또한 연료로부터의 탈루성 NMVOCs 배출로 인한 간접 CO<sub>2</sub> 효과를 산출하기 위하여, 해당 배출원의 NMVOC 프로파일 연구결과로부터 Gillenwater(2008)가 추천한 0.85를 평균 탄소분율로 가정하였다.

#### 2.2.2. NMVOCs로 인한 간접 온실(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>) 효과의 지점별 비교

NMVOC 종별 배출량 정보를 확보할 수 있는 광화학측정망 자료를 이용하여 측정지점별 간접 온실효과

를 산출하고 종별 기여도를 분석하였다. NMVOCs의 간접 온실효과(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>) 산출을 위한 종별 간접 GWP는 Collins 등(2002)의 연구결과를 이용하였으며 사용된 값은 Table 1과 같다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 각국의 온실가스와 NMVOCs 배출현황

온실가스와 NMVOCs 배출정보가 공개된 국가들과 우리나라의 배출 수준을 비교하여 Table 2와 Fig. 1에 나타내었다. 먼저, 온실가스 배출 비중이 높지만 유엔기후변화협약에 온실가스 인벤토리 보고서 제출 의무가 없는 개도국을 포함한 비교를 위하여 국제 에너지 기구(International Energy Agency, IEA)의 자료를 분석한 결과, 부속서 I 국가와 중국, 인도, 브라질 등을 포함한 전 세계에서 2005년 기준 우리나라의 온실가스 배출량은 11위를 차지하였다(Table 2). 유엔기후변화협약에 따른 부속서 I의 40개국은 매년 국가 온실가스 인벤토리 보고서(National Inventory Report)와 공통보고양식(Common Reporting Format)에 따른 배출량을 제출하고 있으며 2009년 제출한 자료를 검토한 바, 모든 해당 국가가 2007년까지의 온실가스 인벤토리를 제출하였으며, NMVOCs 배출량 정보를 함께 제출하였으나 폴란드의 경우 부문에 대한 구분 없이 총량만을, 터키는 에너지와 산업부문, 룩셈부르크는 유

Table 1. Indirect GWPs (100-year) for 10 NMVOCs\*

Compounds	GWP**	GWP_CO <sub>2</sub>	GWP_CH <sub>4</sub>	GWP_O <sub>3</sub>
ethane (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	8.4	2.9	2.9	2.6
propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	6.3	3.0	2.7	0.6
butane (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	7.0	3.0	2.3	1.7
ethylene (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	6.8	3.1	1.5	2.2
propylene (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	4.9	3.1	-2	3.8
toluene (C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> )	6.0	3.3	0.2	2.5
isoprene (C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> )	2.7	0	1.1	1.6
methanol (CH <sub>3</sub> OH)	2.8	0	1.6	1.2
acetaldehyde (CH <sub>3</sub> CHO)	1.3	0	-0.4	1.7
acetone (CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub> )	0.5	0	0.3	0.2

\* Source : Collins et al (2002)

\*\* GWP is calculated by simulating each NMVOC's decay in the air and integrating its atmospheric burden and those of perturbed CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and O<sub>3</sub> over a time horizon of one hundred years.

기용제, 리히텐슈타인은 유기용제와 산업부문 중 광물생산에 대한 NMVOCs 배출량만을 제시하였다 (UNFCCC, 2009). 이들 국가 중 2009년에 유엔기후변화협약에 제출된 2006년 기준 온실가스 배출량 상위 15개국과 우리나라의 1990년과 2006년 온실가스 배출량과 NMVOCs 배출량을 비교한 결과는 Fig. 1과 같다 (에너지경제연구원, 2011; 환경부, 2009; UNFCCC, 2009). 2006년을 기준할 때, 우리나라는 온실가스 배출량에 비해 NMVOCs의 배출량이 상대적으로 낮았으나 대부분의 부속서 I 국가들에서 1990년 대비 2006년에 NMVOCs의 배출량이 감소한 반면, 우리나라는 온실가스가 305백만 CO<sub>2</sub>톤에서 603백만 CO<sub>2</sub>톤으로 약 2배 가까이 증가하였고 NMVOCs의 배출량 또한 520 Gg에서 794 Gg으로 약 1.5배 증가하였다.

자연 배출원을 제외한 인위적 인간 활동에서 비롯된 NMVOCs의 2006년 배출원별 비중을 살펴보면 우리나라는 유기용제 사용이 58.3%로 가장 높으며 산업 공정(17.3%), 수송(15.3%), 폐기물(4.4%), 연료로부터의 증발성 배출(3.3%), 고정연소(1.4%)의 순이다 (환경부, 2009; Fig. 2). 우리나라를 포함하여 Fig. 1에

Table 2. GHG emissions by countries in 2005\*

[Unit : Gg CO <sub>2</sub> eq]		
Ranking	Country	GHG emissions
1	China	7641.5
2	United States	7008.6
3	Brazil	2559.8
4	Russian Federation	2317.7
5	India	2091.9
6	Indonesia	1569.6
7	Japan	1414.1
8	Congo, Democratic Republic of	999
9	Germany	977.2
10	Canada	738.8
11	Korea, Republic of	674.2
12	Mexico	650.3
13	United Kingdom	631.1
14	Australia	594.3
15	Italy	562.2

\*Source: IEA (2009)

Note: Emissions and removals from Land Use, Land Use Change and Forestry were excluded.

서 비교된 15개국 중 부문별 배출량 정보가 없는 폴란드를 제외하고 유기용제의 비율이 가장 높은 나라는 일본이며(74.0%), 우리나라가 두 번째(58.3%), 독일

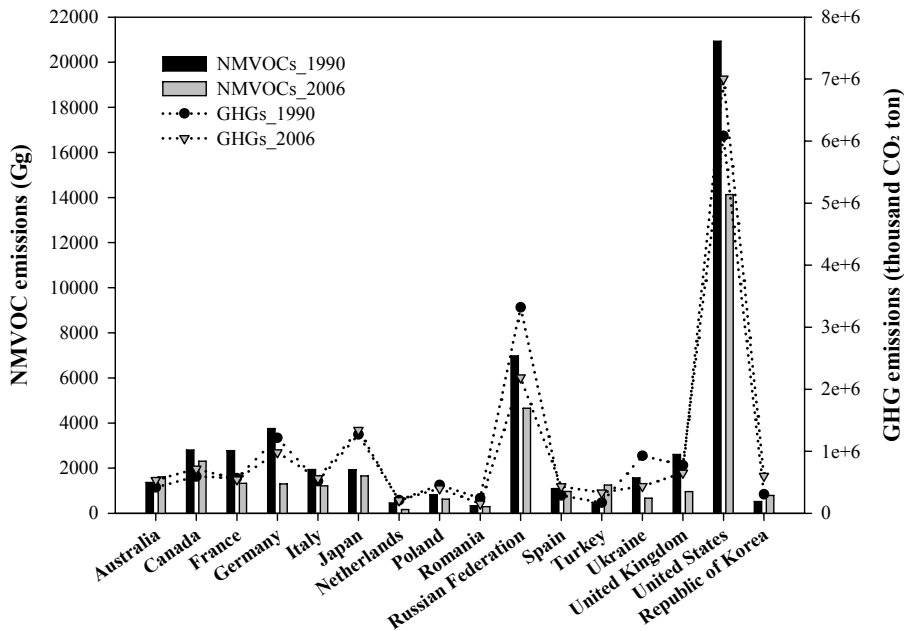


Fig. 1. The emissions of NMVOCs and greenhouse gases in 16 countries in 1990 and 2006.

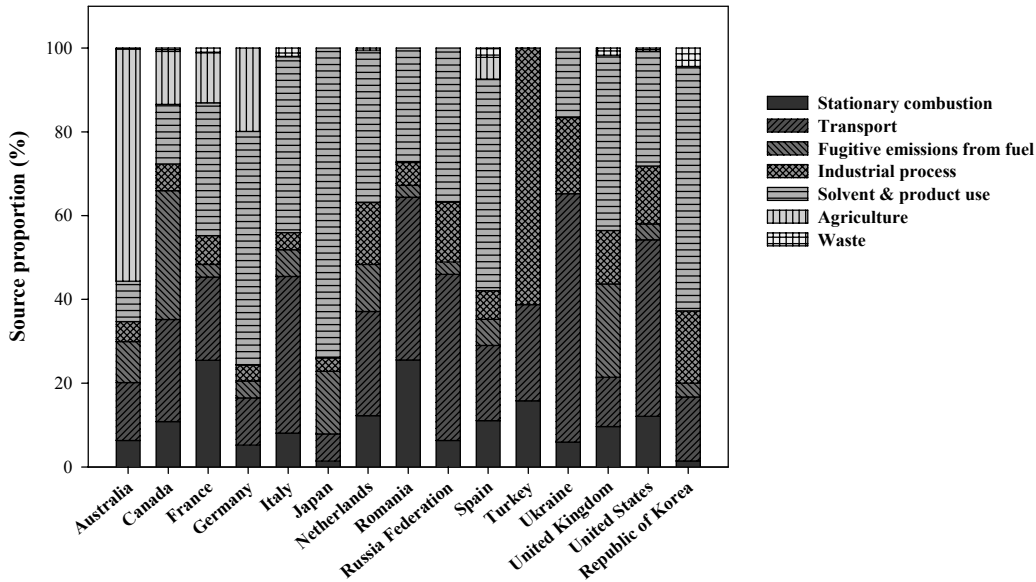


Fig. 2. The proportion of NMVOC sources in 15 countries in 2006.

이(55.7%) 세 번째로 높은 것으로 나타났다(환경부, 2009; UNFCCC, 2009; Fig. 2). 호주는 농업부문, 캐나다는 연료로부터의 증발성 배출이 가장 높은 비중을 차지하였으며, 터키는 부문에 대한 구분이 에너지와 산업공정만으로 한정되어 있어 NMVOCs의 배출이 높은 유기용제와 수송부문의 비율을 고려하지 못하였다. 그 외 8개국(프랑스, 독일, 이탈리아, 일본, 네델란드, 스페인, 영국, 한국)은 유기용제 사용, 4개국(루마니아, 러시아, 우크라이나, 미국)은 수송의 비중이 가장 높은 것으로 나타났다(UNFCCC, 2009; Fig. 2).

### 3.2. 간접 CO<sub>2</sub> 효과의 국가별 비교

배출된 기체가 또 다른 온실가스의 대기 중 부하에 영향을 미칠 때 간접 배출량이 발생하며, 배출된 CH<sub>4</sub>, CO, NMVOCs의 대기 중 산화로 인한 CO<sub>2</sub>는 간접 CO<sub>2</sub>로 일컬어지는데 Gillenwater(2008)에 따르면, CH<sub>4</sub>, CO, NMVOCs의 대기 중 산화에 의한 CO<sub>2</sub>의 생성은 토지이용과 산림을 제외한 전 지구적 온실가스의 인위적 배출량을 0.5~0.7% 증가시킨다. 본 연구에서는 NMVOCs의 대기 중 산화에 의한 간접 CO<sub>2</sub> 효과의 크기를 국가별로 비교해 보기 위하여

NMVOCs의 배출량 비율이 높은 ‘유기용제와 제품 사용’ 부문과 국가 온실가스 인벤토리에서 간접 CO<sub>2</sub> 효과 산출이 제외되어 있는 ‘연료로부터의 탈루성 배출’ 부문을 대상으로 간접 CO<sub>2</sub> 효과를 산출하였다.

2006 IPCC 가이드라인에서 간접 CO<sub>2</sub> 배출량 산정 방법이 제시된 이후 몇몇 국가들은 유기용제와 제품 이용에서 배출되는 NMVOCs의 양을 토대로 간접 CO<sub>2</sub> 배출량을 산출하여 국가 온실가스 인벤토리에 포함시키고 있다. 2009년에 제출된 공동보고양식(CRF)에 간접 CO<sub>2</sub> 배출량을 산출한 국가는 프랑스, 그리스, 독일, 이탈리아, 네델란드, 루마니아, 스페인 등이다. 그 외 호주, 캐나다, 일본, 러시아, 영국, 미국 등은 NMVOCs의 배출량만을 제시하고 간접 CO<sub>2</sub> 배출량을 산출하지 않았으며 우리나라는 유엔기후변화협약에 제출한 제2차 국가보고서까지 유기용제와 제품 사용으로 인한 NMVOCs 배출량과 간접 CO<sub>2</sub> 효과 모두를 제시하지 않고 있다. 2009년에 제출된 2006년 온실가스 배출량과 NMVOCs 배출량을 기준으로 식 (1)에 의해 산출된 유기용제와 제품 사용으로 인한 NMVOCs의 간접 CO<sub>2</sub> 효과는 Table 3과 같다. 동 부문에서 배출되는 NMVOCs의 양은 미국, 러시아, 일본, 독일의 순으로 높았으나 미국은 온실가스의 배출

량 또한 높아 국가 온실가스 배출량에서 차지하는 비율은 0.17%로 상대적으로 낮게 나타났으며, 일본(0.29%), 스페인(0.28%)이 높게 산출되었고, 우리나라는 0.24%를 차지해 러시아(0.24%), 프랑스(0.24%), 이탈리아와(0.24%) 비슷한 수준으로 나타났다.

연료로부터 탈루되는 NMVOCs의 대기 중 산화에 의한 간접 CO<sub>2</sub> 효과는 캐나다가 국가 온실가스 배출량 중 가장 높은 0.31%, 영국이 뒤를 이어 0.10%, 그리고 우리나라는 0.014%를 차지하였다. 이 값은 2008년 기준 부속서 I 국가에서 배출되는 산업폐수로부터의 온실가스 배출량이 부속서 I 국가의 토지이용과 토지이용변화 및 산림(LULUCF)을 제외한 전체 온실가스 배출량의 0.18%를 차지하고 비생물계 기원 폐기물의 소각으로 인한 배출량이 0.08%를 차지하는 것을 고려할 때(UNFCCC, 2011) 결코 적은 값이라고 할 수 없다. 또한, ‘유기용제와 제품 사용’ 부문과 ‘연료로부터의 탈루성 배출’에서의 NMVOCs로 인한 간접 CO<sub>2</sub> 효과의 합은 비교된 국가들에서 국가 온실가스 배출량 중 네덜란드의 0.092%부터 캐나다의 0.45%까지 다양하였다. 우리나라는 연료로부터의 탈루성 배출 부문에서 NMVOCs의 간접 CO<sub>2</sub> 효과가 매우 낮았으나(0.014%) 유기용제와 제품 사용으로 인한 NMVOCs의 간접 CO<sub>2</sub> 효과가 비교적 높게 나타나(0.24%) 두 부분의 합은 전체 온실가스 배출량 중 0.25%를 차지하였다. 비교된 총 14개 국가에서 두 부분의 NMVOCs의 배출로 인한 간접 CO<sub>2</sub> 효과는 부속서 I 국가에서 제출한 2008년 온실가스 인벤토리와 비교해 볼 때, 화학 산업 중 암모니아 생산으로 인한 온실가스 배출량이 전체 온실가스 배출량 중 0.42%, 질산의 생산 0.30%, 산업폐수와 하수의 처리가 0.56% 차지하는데 이와 비교할 만한 값이라고 하겠다(UNFCCC, 2011).

앞에서 언급된 바와 같이 물질수지를 기초로 산출되는 에너지 연소 부문 등 타 부문에서 NMVOCs의 배출량은 물론, 간접 CO<sub>2</sub>의 배출량도 함께 보고되고 있으나, 연료로부터의 탈루성 배출로 인한 간접 CO<sub>2</sub> 효과는 인벤토리에서 명백히 제외되어 있으므로 향후 유엔기후변화협약으로 보고되는 국가 온실가스 인벤토리 목록에 포함될 수 있음을 고려하여야 한다. 또한, 연료로부터의 탈루성 배출로 인한 간접 CO<sub>2</sub> 효과는 청정개발체제와 혹은 그 외 다각적으로 이루어지고

있는 온실가스 감축사업에서 포함 필요성이 제기되고 있는데 석탄광산, 석유, 천연가스 등 탈루성 배출원의 온실가스 배출 저감에 간접 CO<sub>2</sub> 산출을 포함시킬 경우 이들 프로젝트가 얻을 수 있는 배출권의 양을 13%까지 증가시킬 수 있다고 한다(Gillenwater, 2008).

식 (1)을 이용한 NMVOCs의 배출에 기인한 간접 CO<sub>2</sub> 효과는 NMVOCs의 종별 배출량과 배출원별 프로파일이 이용가능하다면 평균 탄소함량을 기초로 보다 신뢰성 있는 값을 산출할 수 있다. 미국, 영국 등의 선진국에서 수행되는 배출원별 프로파일 연구는 간접 온실효과를 산출하는 것 뿐 만 아니라 대기오염물질과 산성비 배출원의 인벤토리와 모델링 연구, 수용모델, 오존 발생저감 등 다양한 목적에도 이용될 수 있으므로 우리나라에서도 배출원별 프로파일 개발에 대한 관심이 필요하다고 하겠다.

### 3.3. 간접 온실효과(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>)의 지역별 비교

우리나라는 현재 광화학오염물질측정망에서 오존전구체인 NMVOCs에 대한 감시 및 오염실태 파악을 목적으로 수도권, 부산, 광양만권 총 15개 측정소에서 56개 항목을 측정하고 있다. 측정 항목 중 기존 연구를 통해 간접 GWP 값이 개발된 ethane, propane, (iso, n)-butane, ethylene, propylene, toluene, isoprene 8종에 대하여(Table 1) 수도권과 부산지역을 대상으로 2004년부터 2008년 사이 이용 가능한 데이터를 활용하여 13개 지점별 측정 농도 값과 간접 온실효과를 비교해 보았으며 iso-butane과 n-butane은 butane으로 통합하여 그림과 표에 나타내었다.

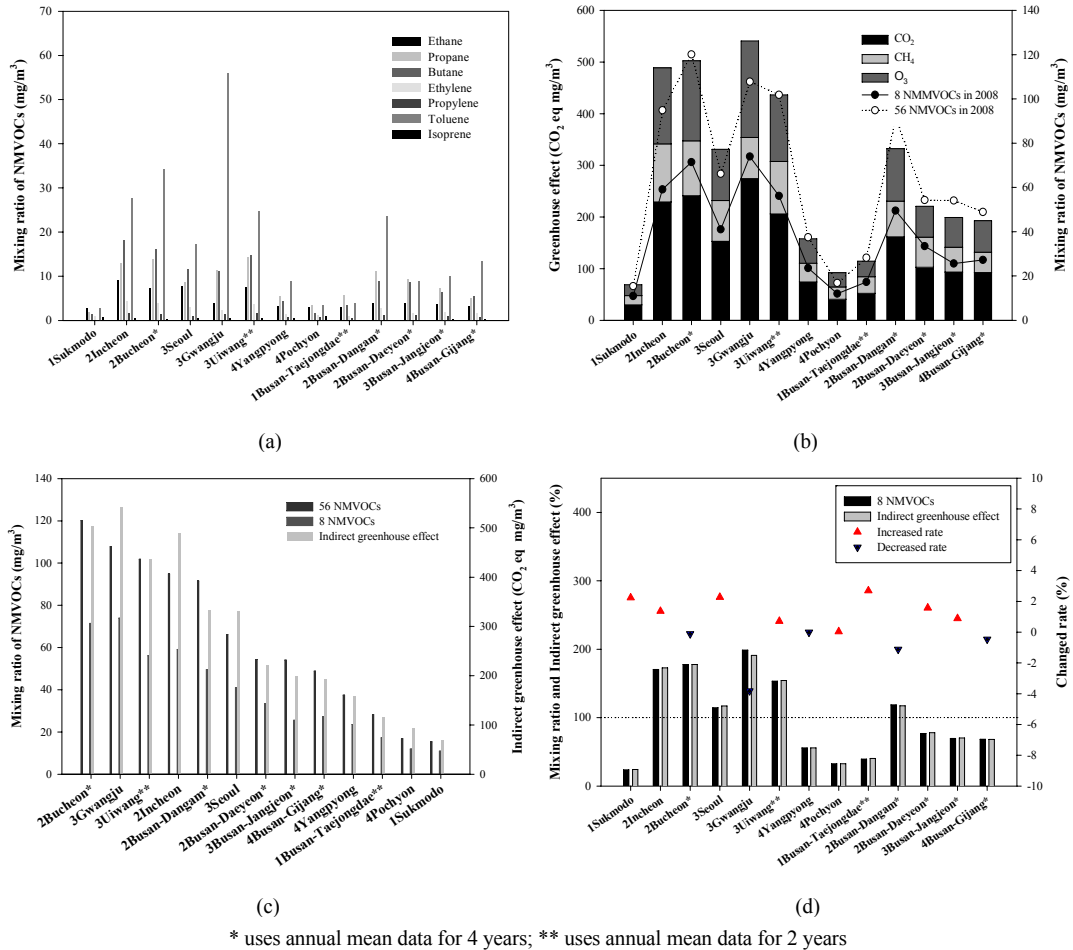
먼저, Fig. 3에서 광화학오염물질측정소의 위치 선정 시 고려된 4가지 지점별 유형, 1형(오존 및 오존전구물질이 유입되는 지점), 2형(오존전구물질이 최고의 농도를 나타내는 지점), 3형(최고의 오존농도를 나타내는 지점), 4형(오존 및 오존 전구물질이 유출되는 지점)에 대한 구분을 측정지점 앞 숫자로부터 확인할 수 있으며, 석모도와 포천을 제외한 수도권에 부산에 비해 전반적으로 높은 농도를 나타내는 한편, 부산지역에 비해 수도권 측정소간 농도 값의 편차가 크고 측정소의 유형별 특징이 보다 뚜렷함을 알 수 있다(Fig. 3(a)). 측정되는 56종 중 간접 GWP가 개발된 8종이

**Table 3.** Comparison of indirect CO<sub>2</sub> effect due to NMVOC emissions from solvent and other product use and fugitive NMVOC emissions from fuels in 2006\*

Emissions	Total GHG emissions (Gg)**	Total NMVOC emissions (Gg)**	NMVOC emissions from solvent & other product use (Gg)	Fugitive NMVOC emissions from fuels (Gg)	Indirect CO <sub>2</sub> effect from solvent and other product use (Gg)	Indirect CO <sub>2</sub> effect from fugitive emissions (Gg)	Indirect CO <sub>2</sub> emissions from solvent & other product use (%)	Indirect CO <sub>2</sub> emissions from fugitive (%)	Sum of indirect CO <sub>2</sub> emissions (%)
Australia	534500	1618.85	156.12	158.86	486.56	495.12	0.091	0.093	0.184
Canada	718000	2305.03	327.65	709.00	1021.18	2209.72	0.14	0.31	0.45
France†	546371	1328.99	421.65	39.80	1314.14	124.03	0.24	0.023	0.26
Greece†	128089	210.92	53.68	32.56	159.64	101.49	0.13	0.079	0.20
Germany†	980667	1298.46	723.81	52.76	2171.42	164.44	0.22	0.017	0.24
Italy†	562982	1221.14	512.48	78.03	1354.03	243.20	0.24	0.043	0.28
Japan	1342109	1657.27	1225.58	247.69	3819.73	771.95	0.29	0.058	0.35
Netherlands†	208508	163.14	59.23	18.32	134.9	57.09	0.065	0.027	0.092
Romania†	153840	295.85	80.86	8.21	208.5	25.58	0.14	0.017	0.16
Russia federation	2185883	4659.46	1713.05	136.40	5339.00	425.11	0.24	0.019	0.26
Spain†	433070	973.63	491.95	60.70	1206.96	189.18	0.28	0.044	0.32
United Kingdom	649220	958.64	401.42	213.59	1251.10	665.70	0.19	0.10	0.29
United States	7051100	14128.95	3867.39	535.25	12053.38	1668.19	0.17	0.024	0.19
Republic of Korea	602600 ****	794.16	463.22	26.12 ***	1443.70	81.42	0.24	0.014	0.25

Sources : \*UNFCCC(2009) unless otherwise notified, \*\*Emissions and removals from Land Use, Land Use Change and Forestry were excluded, \*\*\*Ministry of Environment(2009), \*\*\*\*Korea Energy Economics Institute (2011) † These countries' indirect CO<sub>2</sub> effects were reported by common reporting format to UNFCCC





**Fig. 3.** Comparison of mixing ratios and indirect greenhouse effect at 13 monitoring site between 2004 and 2008. (a) Mean mixing ratio by selected 8 species, (b) Indirect CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and O<sub>3</sub> effect by selected 8 species, (c) Comparison of the mixing ratios of NMVOCs and indirect greenhouse effect (d) Normalized mixing ratios, indirect greenhouse effect, and changed rate.

전체 56종에 차지하는 비중은 13개 측정소의 측정값이 모두 존재하는 2008년도 측정값을 기준으로 할 때 부산 장전동이 47.4%로 50% 이하의 최저 비중을 나타내었으나 나머지 12개 측정소 모두 50%를 초과하였고 인천 구월동, 서울 불광동, 경기도 광주, 양평, 부산 대연동은 60% 이상, 석모도와 포천은 70%를 초과하는 높은 비중을 차지하였다(Fig. 3(b)).

8종의 NMVOCs에 대해 산출된 간접 온실효과는 석모도와 포천을 제외한 수도권과 부산지역의 차이가 컸으며 2, 3형의 값이 높게 나타나 지점별 농도와 비

슷한 추이를 나타낸다고 볼 수 있으나 Fig. 3(c)에서 8종의 NMVOCs 농도 순위와 비교할 경우 종별 온실효과 크기의 차이를 반영하여 부산의 장전동과 기장의 순위가 변화되었다. 그리고 Fig. 3(b)에서 확인할 수 있듯이 간접 온실효과에 대한 간접 CO<sub>2</sub>의 영향이 47.6%로 가장 컸으며, O<sub>3</sub> 30.6%, CH<sub>4</sub> 21.8% 기여하여 간접 CH<sub>4</sub> 효과는 간접 CO<sub>2</sub> 효과의 1/2이하로 산출되었다. Fig. 3(d)에서는 13개 측정지점에서 측정된 8종의 NMVOCs 평균값을 기준하여 각 지점별 측정값의 비율을 구하고 간접 온실효과 또한 평균값을 기준

\* uses annual mean data for 4 years; \*\* uses annual mean data for 2 years

으로 비율을 구하여 각 지점별 비율의 변화율을 산출한 결과이다. 평균값을 기준하여 비교할 때 경기도 부천과 광주, 부산의 당감과 기장에서 간접 온실효과의 비율이 상대적으로 낮아졌음을 의미하는 음의 변화율을 보였다.

Table 4는 NMVOCs의 농도와 간접 온실효과가 가장 낮은 석모도의 값으로 각 지점별 농도와 간접 온실효과 값을 나누어 지수화한 결과이다. 경기도 부천은 석모도에 비해 56종의 NMVOCs (Index\_56)와 8종의 NMVOCs(Index\_8) 농도가 각각 7.80배, 7.46배, 경기도 광주는 7.00배와 8.33배로 그 격차가 매우 크며 포천은 1.09배, 1.37배로 석모도와 측정된 농도값이 가장 유사한 지역으로 설명될 수 있다. 이때, 간접 온실효과가 산출된 8종의 NMVOCs의 농도 합이 동일하다고 가정하되, 각 종별 비율 차이만을 인정한 Index\_P의 경우 지점별로 큰 차이를 보이지는 않았으나 8종의 NMVOCs 중 톨루엔의 비중이 64.8%로 (Table 5) 매우 높은 경기도 광주가 Index\_P가 가장 낮은 0.94였고 Index\_P값이 하위 4곳에 포함되는 광주, 부산 당감과 기장, 그리고 경기도 부천은 Fig. 3(d)에서 확인할 수 있듯이 간접 온실효과 비율이 하락된 결과를 보였다. Index\_C는 13개 지점에서 측정된 NMVOCs 각 종의 비율의 차이와 농도 합을 모두 고려하여 산출된 결과로 석모도를 기준으로 경기도 광주가 가장 높고 경기도 부천>인천의 구월>경

기도 의왕>부산 당감>서울 불광>부산 대연>장전>기장>경기도 양평>부산 태종대>경기도 포천의 순으로 산출되었다.

Table 5에 나타내었듯이 비교된 13개 지점 중 부산 태종대와 대연을 제외한 11개 지점에서 톨루엔의 농도비중이 가장 높게 나타났으나 간접 온실효과를 산출하였을 때 13개 지점 중 석모도와 포천, 부산 태종대와 대연을 제외한 9곳에서 톨루엔의 비중이 가장 높게 나타나 그 비중이 다소 축소된 것으로 확인되었다. 각각 1형과 4형에 해당하는 석모도와 포천은 톨루엔의 농도 비중이 27.3%, 24.5%로 가장 높은 비중을 차지하였으나 간접 온실효과에 대한 비중은 에탄이 각각 32.3%와 27.8%로 가장 높게 산출되었으며 태종대는 프로판이(30.9%) 가장 높은 비중을 차지하고, 대연은 프로판과(26.8%) 부탄의(27.2%) 비중이 비슷한 비율로 산출되었다.

Fig. 4는 13개 지점의 농도와 간접 온실효과에 대한 영향을 종별로 평균한 결과로, Table 1에 나타낸 바와 같이, 높은 간접 GWP를 갖는 ethane, butane, ethylene의 비중이 상대적으로 높아진 것을 확인할 수 있다.

#### 3.4. 종별 건강영향, 오존생성기여도, 간접 온실효과 비교

그동안 VOCs는 인체에 미치는 건강영향과 악취, 오존생성 완화를 위하여 관리되어 왔으며, Maximum Incremental Reactivity(MIR), Propene-equivalent

**Table 4.** Comparison of estimated index to mixing ratios and indirect greenhouse effect

Site	Index_56	Index_8	Index_P	Index_C
1Sukmodo	1.00	1.00	1.00	1.00
2Incheon	6.16	7.15	0.99	7.09
2Bucheon*	7.80	7.46	0.98	7.29
3Seoul	4.30	4.80	1.00	4.80
3Gwangju	7.00	8.33	0.94	7.84
3Uiwang**	6.62	6.43	0.99	6.33
4Yangpyong	2.44	2.34	0.98	2.29
4Pochyon	1.09	1.37	0.98	1.34
1Busan-Taejongdae**	1.84	1.65	1.00	1.66
2Busan-Dangam*	5.95	4.98	0.97	4.82
2Busan-Daeyeon*	3.53	3.22	0.99	3.20
3Busan-Jangjeon*	3.51	2.92	0.99	2.88
4Busan-Gijang*	3.18	2.87	0.97	2.80

\* uses annual mean data for 4 years; \*\* uses annual mean data for 2 years

**Table 5.** Contribution of each species to 8 NMVOC mixing ratios and indirect greenhouse effect at 13 sites

Site	8 NMVOCs (mg/m <sup>3</sup> )	Total indirect greenhouse effect (CO <sub>2</sub> eq mg/m <sup>3</sup> )														
		Ethane (%)	Propane (%)	Butane (%)	Ethylene (%)	Propylene (%)	Toluene (%)	Isoprene (%)	Ethane (%)	Propane (%)	Butane (%)	Ethylene (%)	Propylene (%)	Toluene (%)	Isoprene (%)	
1Sukmodo	10.4	25.6	17.0	13.7	8.9	1.4	<b>27.3</b>	6.2	69.0	<b>32.3</b>	16.1	14.4	9.1	1.1	24.6	2.5
2Incheon	74.1	12.2	17.5	24.6	5.7	2.2	<b>37.2</b>	0.6	488.9	15.6	16.7	26.1	5.9	1.6	<b>33.8</b>	0.2
2Bucheon*	77.3	9.5	18.0	21.0	5.1	1.9	<b>44.3</b>	0.3	502.5	12.2	17.4	22.6	5.4	1.4	<b>40.8</b>	0.1
3Seoul	49.8	15.6	17.5	23.4	5.9	2.0	<b>34.8</b>	0.9	331.2	19.7	16.5	24.6	6.0	1.5	<b>31.4</b>	0.4
3Gwangju	86.4	4.6	13.1	12.8	2.5	1.6	<b>64.8</b>	0.6	540.7	6.1	13.2	14.3	2.8	1.2	<b>62.1</b>	0.3
3Uiwang**	66.6	11.1	21.3	22.2	5.6	2.2	<b>37.0</b>	0.6	436.6	14.2	20.5	23.7	5.8	1.7	<b>33.8</b>	0.2
4Yangpyong	24.2	13.0	22.5	17.5	5.3	3.2	<b>36.9</b>	1.6	157.7	16.7	21.8	18.8	5.5	2.4	<b>34.0</b>	0.7
4Pocheon	14.2	21.6	23.6	11.2	8.4	4.3	<b>24.5</b>	6.4	92.3	<b>27.9</b>	22.9	12.0	8.8	3.2	22.5	2.7
1Busan-Taejongdae**	17.1	16.7	<b>32.8</b>	19.3	5.2	3.3	22.1	0.5	114.5	21.1	<b>30.9</b>	20.2	5.3	2.4	19.9	0.2
2Busan-Dangam*	51.6	7.7	21.6	17.3	5.4	2.2	<b>45.7</b>	0.2	332.3	10.0	21.1	18.8	5.7	1.7	<b>42.6</b>	0.1
2Busan-Daeyeon*	33.4	11.4	<b>28.1</b>	25.6	4.8	3.3	26.6	0.2	220.8	14.5	26.8	<b>27.2</b>	4.9	2.5	24.1	0.1
3Busan-Jangjeon*	30.3	11.7	24.1	21.2	6.4	3.1	<b>32.9</b>	0.6	199.0	15.0	23.1	22.6	6.7	2.3	<b>30.1</b>	0.2
4Busan-Gijang*	29.8	10.8	17.1	18.2	5.1	2.6	<b>45.2</b>	0.9	192.8	14.1	16.6	19.7	5.4	2.0	<b>41.9</b>	0.4

\* uses annual mean data for 4 years; \*\* uses annual mean data for 2 years  
Note: Bold figures mean the highest proportion

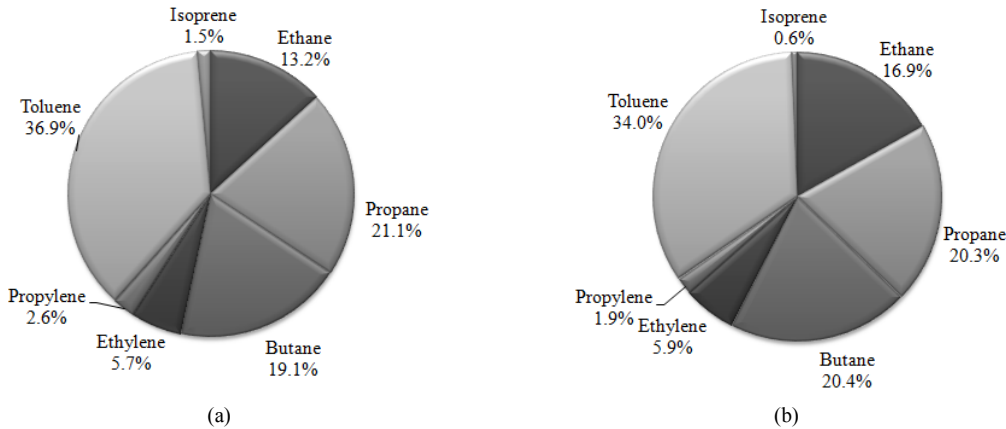


Fig. 4. Contributions of selected 8 NMVOCs to mixing ratio and indirect greenhouse effect. (a) mixing ratio, (b) indirect greenhouse effect.

concentration, Photochemical ozone creation potential 과 같은 척도로 오존생성기여도를 산출하고, 발암과 비발암 위해도를 평가하였으나 국내에서는 휘발성 유기화합물이 온실효과에 미치는 영향에 대한 고려는 거의 이루어지지 않았다. 앞서 설명된 바와 같이, Collins 등(2002)은 10종의 NMVOCs에 대해 대류권 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, 오존에 대한 영향을 고려하여 간접 GWP를 산출하였으며 연구된 각 종별 간접 GWP와 오존생성 잠재력을 산출하기 위해 여러 연구에서 사용되어 온 MIR, 건강 위해성 평가에 이용되는 참고농도

(Reference concentration, RfC(mg/m<sup>3</sup>))와 참고치 (Reference dose, RfD(mg/kg-day))를 활용하여 (Carter, 2010; Choi 등 2010; Choi 등 2011; USEPA, 2011). 종별 간접 GWP와 오존생성 잠재력, 건강영향 특성을 비교하여 Table 6에 함께 나타내었다.

Table 6에서 보여진 MIR은 해당 VOCs 단위체적당 생성되는 오존의 양을 뜻하는 것으로 오존 생성 기여도를 파악하기 위해 대표적으로 이용되며 MIR(VOCs 당 생성된 오존, 무차원)에 VOCs의 농도 (μg/m<sup>3</sup>)를 곱하면 오존생성기여도가 산출된다(Carter,

Table 6. Indirect GWPs (100-year), ozone formation potential, chronic health effects for 10 NMVOCs

Compounds	GWP*	GWP_CO <sub>2</sub> *	GWP_CH <sub>4</sub> *	GWP_O <sub>3</sub> *	Maximum incremental reactivity **	Chronic health effects***	
						Reference concentration or reference dose	Exposure pathway
ethane (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	8.4	2.9	2.9	2.6	0.28	n/a	
propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	6.3	3.0	2.7	0.6	0.49	n/a	
butane (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	7.0	3.0	2.3	1.7	1.23(for iso-), 1.15(for n-)	n/a	
ethylene (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	6.8	3.1	1.5	2.2	9.00	n/a	
propylene (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	4.9	3.1	-2	3.8	11.66	n/a	
toluene (C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> )	6.0	3.3	0.2	2.5	4.00	0.08 mg/kg-day 0	oral inhalation
isoprene (C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> )	2.7	0	1.1	1.6	10.61	n/a	
methanol (CH <sub>3</sub> OH)	2.8	0	1.6	1.2	0.67	0.5 mg/kg-day	oral
acetaldehyde (CH <sub>3</sub> CHO)	1.3	0	-0.4	1.7	6.54	0.009 mg/m <sup>3</sup>	inhalation
acetone (CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub> )	0.5	0	0.3	0.2	0.36	0.9 mg/kg-day	oral

Sources : \* Collins et al (2002), \*\* Carter (2010), \*\*\* USEPA (2011)

Note : acetaldehyde is classified as B2, which means probable human carcinogen

2010).

$$O_3 \text{ formation}(j) = \text{Conc.}(j) \times \text{MIR coefficient} \quad (2)$$

참고치(mg/kg-day)와 참고농도(mg/m<sup>3</sup>)는 각각 악영향이 관찰되지 않는 독성물질의 역치값과 역치 농도를 의미하며, USEPA(2011)의 Integrated Risk Information System에 제시된 값으로, 섭취와 흡입으로 인한 비발암 위험도 지표인 위험비율(Hazard Quotient, HQ)을 산출하기 위한 기준 값이다. 흡입의 경우 참고 농도를 대상인구의 호흡량과 체중 대표치를 이용하여 참고치로 전환하고, 일일평균 흡입량을 참고치로 나누어 주면 비발암 위험도를 평가하기 위한 HQ가 산출되는 것이다(USEPA, 1989). 이때, HQ가 1보다 크면 유해한 인체영향의 잠재성이 있다는 것을 의미하는데 참고치가 작을수록, HQ가 상대적으로 크게 산출되므로 참고치가 작다는 것은 독성이 크다는 것을 의미한다.

Table 6에서 알 수 있듯이 비교된 10종의 VOCs 중 오존생성기여도나 건강위해성이 상대적으로 낮게 평가되는 에탄과 프로판은 각각 첫 번째, 네 번째로 높은 간접 온실효과를 갖는다는 것을 알 수 있다. 또한, MIR 값이 가장 큰 프로필렌의 간접 온실효과는 하위 세 번째이고, MIR 값이 비교적 높으면서 흡입독성이 강하고 인체발암우려가 있는 아세트알데히드의 간접 GWP는 하위 두 번째로 매우 낮게 나타났다. 즉, NMVOCs 각 종의 온실효과는 건강영향 및 오존생성 기여도와 그 순서를 매우 달리 하고 있다.

에탄, 프로판, 부탄과 같은 가벼운 알칸족 NMVOCs는 화석연료로부터의 증발성 배출원에서 높은 비율로 배출되므로(Choi 등, 2010; Choi 등, 2011; Watson 등, 2001) 연료로부터의 탈루성 부문에서 간접 CO<sub>2</sub> 효과의 국가 온실가스 인벤토리 추가 논의와 함께 동 배출원에 대한 중요성이 부각될 수 있다고 하겠다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 기존 관점에서 연구되어 온 NMVOCs의 오존생성 잠재력이나 건강영향의 측면보다 간접 온실효과 유발 측면의 특성을 살펴보았으며 결론은 다

음과 같다.

첫째, 국가별 NMVOCs 인벤토리를 이용하여 13개 부속서 I 국가와 우리나라의 간접 CO<sub>2</sub> 효과를 산출하였고 일부 국가에서만 산출하여 유엔기후변화협약으로 보고되고 있는 ‘유기용제와 제품 사용’ 부문은 국가 온실가스 배출량 중 0.065%부터 0.29%를 차지하였고, 온실가스 인벤토리에서 보고되지 않고 있으나 온실가스 인벤토리 포함 가능성이 논의되는 ‘연료로부터의 탈루성 배출’ 부문은 0.014 ~ 0.31%를 차지하였다. 두 부문을 합친 간접 CO<sub>2</sub> 효과는 국가별로 0.092 ~ 0.45%로 나타나 2008년 기준 부속서 I 국가의 비생물계 기원 폐기물의 소각으로 인한 배출량(0.08%), 화학산업 중 암모니아 생산으로 인한 온실가스 배출비율(0.42%), 질산의 생산으로 인한 배출비율(0.30%), 산업폐수와 하수의 처리로 인한 온실가스 배출비율(0.56%)과 비교될 수 있었다. 우리나라는 ‘연료로부터의 탈루성 배출’ 부문의 간접 CO<sub>2</sub> 효과가 매우 낮은 수준으로 확인되었으나 ‘유기용제와 제품 사용’ 부문에서 NMVOCs의 간접 CO<sub>2</sub> 효과는 국가 온실가스 인벤토리 중 0.24%로 다른 국가와 비교할 때 높은 비율을 차지하였다.

둘째, 간접 GWP가 이용 가능한 8종의 NMVOCs를 대상으로 수도권과 부산지역의 광화학측정망에서 2004년부터 2008년 사이 이용 가능한 농도자료로 간접 온실효과(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>)를 산출하고 농도와 간접 온실효과에 대한 기여도 변화를 살펴본 결과, 국내 13개 광화학측정소 중 11개 지점에서 8종의 NMVOCs 중 톨루엔의 농도 기여도가 가장 높았으나 13개 지점 중 9개 지점에서 톨루엔의 간접 온실효과가 가장 높은 것으로 그 비율이 축소되었다. 국가배경농도지역과 지역배경농도지역으로 구분되는 석모도와 포천에서 톨루엔의 농도 기여도가 가장 높았으나 간접 GWP 차이를 반영하여 간접 온실효과 기여도는 에탄이 가장 높게 나타났고 부산 태종대와 대연은 프로판 혹은 부탄의 기여도가 가장 높게 산출되었다. 그리고 13개 지점의 평균값을 기준으로 할 때, 간접 GWP 값이 높은 에탄, 부탄, 에틸렌의 간접 온실효과 기여도 증가가 확인되었다.

셋째, 오존생성기여도 및 건강영향과의 상대적 비교를 위하여 간접 GWP 값이 알려진 NMVOCs 중에

대해 간접 GWP, MIR, 참고농도(RfC) 및 참고치(RfD)를 비교하였다. 현 단계에서 연구된 간접 GWP 자료가 NMVOC 종별로 다양하지 않다는 제한점은 있으나 광화학반응성과 건강영향 측면에서 그 중요성이 크지 않아 주요 관리대상에서 제외되어 온 에탄과 부탄 등이 비교된 10종 NMVOCs 중 상대적으로 간접 온실효과가 높음을 확인하였고 상대적으로 높은 MIR 값을 가지면서 인체 유력한 발암물질로 분류되는 아세트알데히드가 10종 NMVOCs 중 2번째로 낮은 간접 GWP를 가지는 것으로 나타났다.

그동안 오존 생성 기여도나 건강 위해도가 낮다는 이유로 가벼운 알칸족에 대한 관심이 상대적으로 부족하였으나 화석연료의 탈루성 배출에서 간접 CO<sub>2</sub> 효과의 산출이 의무화될 수 있다는 점과 현재시점의 이용 가능한 연구결과로부터 간접 온실효과가 상대적으로 높은 에탄, 부탄이 LPG, CNG, 유증기 등 화석연료로부터의 증발성 배출에 의한 비중이 높다는 점은 VOCs 배출 비중이 가장 높은 유기용제 사용 억제 중심의 기존 배출원 관리대책에 추가적인 조치가 필요할 수 있음을 시사한다. 덧붙여 유엔기후변화협약은 '유기용제와 제품 사용' 부문에서 NMVOCs 배출량과 이로 인한 간접 CO<sub>2</sub> 효과를 함께 산출하여 보고하도록 정하고 있으므로, 우리나라 또한 동 부문에서 간접 온실가스로서의 NMVOCs에 대한 체계적인 관리가 필요하다고 하겠다. 특히 부속서 I 국가들의 경우 1990년 대비 NMVOCs를 비롯한 간접 온실효과 유발 가스의 배출량이 감소하고 있으나 우리나라를 포함한 개도국은 NMVOCs의 배출량이 지속적으로 증가되어 왔다. 국제사회에서는 선진국은 물론 개도국에 대해서도 측정, 보고, 검증 가능한(Measurable, Reportable, and Verifiable, MRV) 원칙에 입각한 인벤토리의 구축 요구가 가중되고 있는 상황이므로 온실가스 뿐만 아니라 간접 온실가스인 NMVOCs의 배출원별 프로파일을 개발하여 종별, 배출원별 인벤토리를 구축하여 통계를 선진화한다면, 오존생성 억제, 건강영향 최소화, 온실효과 유발 최소화 등의 종합적인 목적을 달성하기 위한 중요한 기반이 마련될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

- 에너지경제연구원, 2011, 온실가스배출통계, <http://www.kesis.net/flexapp/KesisFlexApp.jsp>.
- 환경부, 2005, 대기환경연보(2004), 부록 7.
- 환경부, 2006, 대기환경연보(2005), 부록 7.
- 환경부, 2007, 대기환경연보(2006), 부록 7.
- 환경부, 2008, 대기환경연보(2007), 부록 7.
- 환경부, 2009, 대기환경연보(2008), 부록 7과 부록 13.
- Choi, E., Heo, J. B., Yi, S. M., 2010, Apportioning and locating non-methane hydrocarbon sources to a background site in Korea, *Environ Sci Technol*, 44(15), 5849-5854.
- Choi, E., Heo, J. B., Hopke, P. K., Jin, B. B., Yi, S. M., 2011, Identification, apportionment, and photochemical reactivity of non-methane hydrocarbon sources in Busan, Korea, *Water Air Soil Poll*, 215(1-4), 67-82.
- Carter, W. P. L., 2010, Development of the SAPRC-07 chemical mechanism and updated ozone reactivity scales, Report to the California Air Resources Board, Contracts No. 03-318, 06-408, and 07-730
- Collins, W. J., Derwent, R. G., Johnson, C. E., Stevenson, D. S., 2002, The oxidation of organic compounds in the troposphere and their global warming potentials, *Climatic Change*, 52(4), 453-479.
- Gillenwater, M., 2008, Forgotten carbon: indirect CO<sub>2</sub> in greenhouse gas emission inventories, *Environ Sci Policy*, 11(3), 195-203.
- IEA, 2009, CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion, OECD/IEA, Paris, France, III.44-III.47
- IPCC, 1990, Climate change : The IPCC scientific assessment, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 58-61.
- IPCC, 1997, Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse inventories, IPCC/OECD/IEA, Paris, France.
- IPCC, 2000, Emissions scenarios, Cambridge University Press, UK, 570.
- IPCC, 2006, 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, IGES, Japan.
- IPCC, 2007, Climate change 2007 : The physical science basis, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 214
- UNFCCC, 2006, Updated UNFCCC reporting guidelines on annual inventories following incorporation of

- the provisions of decision 14/CP.11. FCCC/SBSTA/2006/9.
- UNFCCC, 2009, Annex I party GHG inventory submissions, [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/4771.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/4771.php).
- UNFCCC, 2011, Greenhouse gas inventory data - Detailed data by party, <http://unfccc.int/di/DetailedByParty.do>.
- US Environmental Protection Agency, 1989, Risk assessment guidance for superfund (RAGS), Volume I, Part A, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C.
- US Environmental Protection Agency, 2011, Integrated risk information system, <http://www.epa.gov/IRIS>.
- Watson, J. G., Chow, J. C., Fujita, E. M., 2001, Review of volatile organic compound source apportionment by chemical mass balance, *Atmos Environ.*, 35(9), 1567-1584.