

한반도 서해안 배경관측점을 중심으로 한 대기 중 메탄의 배출과 침적

The Soil-air Exchange Characteristics of Methane in a Western Coastal Area of Korea during Spring 2002

김민영 · 조석주 · 김 준¹⁾ · 이강웅²⁾ · 김기현^{3)*}
서울시 보건환경연구원, ¹⁾연세대학교 대기과학과,
²⁾한국외국어대학교 환경학과, ³⁾세종대학교 지구환경과학과
(2002년 9월 3일 접수, 2003년 3월 11일 채택)

Min-Young Kim, Suk-Choo Cho, Joon Kim¹⁾,
Gangwoong Lee²⁾ and Ki-Hyun Kim^{3)*}
Seoul Metropolitan Research Institute of Public Health and Environment,
¹⁾*Dept. of Atmospheric Science, Yonsei University,*
²⁾*Dept. of Environmental Sciences, Hankook University of Foreign Studies*
³⁾*Dept. of Earth & Environmental Sciences, Sejong University*

(Received 3 September 2002, accepted 11 March 2003)

Abstract

The soil-air exchange processes of CH₄ were investigated in Hari district of Kang Hwa Island, Korea during the late April 2002. In the course of our field experiments, we measured the concentration, concentration gradients (between two different heights of 1 and 5 m), and the fluxes of CH₄ using the surface layer gradient micrometeorological methods. If the relationships between CH₄ fluxes and the relevant environmental parameters are examined, CH₄ fluxes were found to be affected most significantly by parameters like wind speed. The results of our study indicate that the study area behaved as a net source of CH₄ to the atmosphere with a net daily emission rate of 3.6 mg m⁻². The findings of relatively low exchange rate observed at our study site suggest that the rice paddy area investigated prior to planting period can behave as a moderate source of methane.

Key words : Regional background, Soil-air exchange, Emission, Dry deposition, Mercury

1. 서 론

지구의 대기환경을 파괴할 수 있는 여러 가지 현

실적 또는 잠재적 요인 중에서 지구온난화의 중요성은 온실기체의 배출량 증가와 연계되어 많은 과학자들의 관심을 받아 왔다. 이러한 관심은 이들 온실기체의 배출특성이나 배출규모를 정량적으로 규명할 수 있는 연구를 촉진하는 계기를 제공하였다. 따라서 단순히 온실기체를 대표하는 이산화탄소나

* Corresponding author
Tel : +82-(0)2-3408-3233, E-mail : khkim@sejong.ac.kr

메탄과 같은 성분들의 인위적 배출원에 대한 역할을 규명하는 것 뿐 아니라, 이들의 주요 발생원이자 소멸원에 해당하는 지구의 환경생태 시스템에 대한 역할을 규명하는 부분도 중요한 위치를 차지하게 되었다(IPCC, 1995). 현실적으로 이산화탄소를 제외하면, 메탄이 그 다음으로 가장 중요한 온실기체로 간주되고 있다. 온실효과와 관련된 메탄의 중요성으로 인해, 메탄과 관련한 사항은 전지구적인 관심거리로 취급되고 있다.

대기환경 중에서 발견되는 주요 온실기체성분인 메탄의 배출이나 침적과 같은 교환현상에 대한 정량적인 정보는 단순히 이들의 배출특성을 파악하는데 유용할 뿐 아니라, 대기환경을 매개로 진행되는 메탄의 순환현상을 파악하는데 가장 기본적인 정보를 제공할 수 있다. 전 지구적 규모로 배출되는 메탄의 규모는 연간 단위로 대략 420~620 Tg으로 추정되고 있다(Khalil and Rasmussen, 1990). 이중 70~80% 정도의 메탄은 생물학적 기원에 연계하여 발생하는 것으로 알려지고 있다. 본 연구에서는 환경요인이 메탄의 수직적인 유동특성에 미치는 영향을 보다 세밀하게 분석하기 위한 목적으로, 한반도

서해안 지역에 위치한 강화도지역을 대상으로 메탄의 교환특성을 세밀하게 분석하고자 하였다. 본 연구는 황사의 발생이 완전히 정지된 2002년 4월 초의 봄철 기간을 택하여, 강화지역의 농경지를 중심으로 지표-대기간에 진행되는 메탄의 수직적인 플럭스를 미기상학적인 기법을 응용하여 관측하였다. 본 연구대상지역에서는 이미 2001년 봄철에 수은과 같은 미량금속 성분의 농도와 교환량을 실측한 바 있다(Kim *et al.*, 2002). 본 관측사업이 이루어진 2002년 봄철에는 메탄의 교환율측정을 최초로 시도하였다. 이와 같은 관측에 덧붙여, 또 다른 주요 온실기체로 간주되는 이산화탄소 및 대기 중 극미량 성분으로 존재하는 수은의 교환율도 동시에 관측하였다. 본 연구관측 결과를 토대로, 메탄의 교환현상과 외부 환경조건과의 복잡한 관계에 대한 설명을 여러 가지 관점에서 제시하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상지역의 특성

본 연구가 이루어진 강화도 하리지역에 대한 설

Table 1. A statistical summary of CH₄-related data sets and the basic environmental parameters determined concurrently during the whole study period.

A. CH₄-related concentrations.

	CH ₄ (L)* ppb	CH ₄ (U) ppb	ΔCH ₄ ppb	Flux CH ₄ mg m ⁻² h ⁻¹	K m s ⁻¹
Mean	1815	1812	1.945	0.150	0.060
Median	1798	1791	-2.666	-0.183	0.062
SD	98.91	90.83	32.84	7.000	0.034
Min	1614	1678	-115.9	-22.78	0.008
Max	2178	2183	152.3	32.82	0.131
N	158	156	155	112	116
CI(90%)	13.02	12.03	4.365	1.097	0.005
CI(90%)	0.39	0.02	2.46	0.27	

B. Basic meteorological parameters.

	TEMP. °C	UV MW cm ⁻²	RH %	windspeed m s ⁻¹
Mean	12.4	0.09	59.9	3.97
Median	12.5	0.00	57.0	3.70
SD	2.99	0.15	18.8	2.07
Min	6.30	0.00	28.0	1.00
Max	21.2	0.52	91.0	9.60
N	159	159	159	159

C. The concentrations of both gaseous and particulate pollutants.

	SO ₂ ppb	NO ppb	NO ₂ ppb	NO _x ppb	CH ₄ ppm	NMHC ppm	THC ppm	O ₃ ppb	CO ppm	CO ₂ ppm	PM _{2.5} μg m ⁻³	PM ₁₀ μg m ⁻³
Mean	1.09	1.84	7.95	9.35	1.80	0.41	2.20	41.5	0.31	384	46.6	60.7
Median	1.00	1.00	5.00	6.00	1.75	0.38	2.16	40.0	0.30	383	44.0	55.0
SD	0.46	2.33	8.01	9.39	0.22	0.13	0.18	11.1	0.11	12.2	26.7	37.1
Min	1.00	1.00	1.00	2.00	1.49	0.14	1.91	16.0	0.10	364	6.00	12.0
Max	5.00	20.0	38.0	49.0	2.69	0.73	2.98	89.0	0.60	411	167	274
N	159	158	158	158	159	159	159	158	158	120	159	159
CI(90%)	0.06	0.31	1.05	1.24	0.03	0.02	0.02	1.46	0.02	1.84	3.50	4.86

* Capital letters L and U denote lower (1 m) and upper level (5 m) above ground for CH₄ gradient measurements, respectively.

명은 이미 Kim *et al.* (2002)에 의해 상세하게 기술된 바 있다. 강화도는 서해안에 인접한 도서지역이다. 메탄에 대한 미기상학적 교환율의 측정은 하리 지역의 광활한 농경지를 배경으로 2002년 4월 23일 (JD = 113)에서 30일 (JD = 120)까지 8일 기간에 걸쳐 이루어졌다. 본 연구가 시도된 4월 말 기간에는 아직까지 본격적으로 농작이 시작되지 않고, 농경지의 토양이 그대로 방치된 상황이 유지되었다. 연구기간 중 이동차량에 탑재된 장비를 통해 현장 실측된 주요 환경변수들의 변화양상에 대한 정보는 표 1에 제시하였다. 본 연구가 이루어진 2002년도의 4월 말 기간의 연구지역에 대한 주변 여건을 부연하면, 4월 초까지 집중되던 황사의 발현이 중단되었다. 표 1에 제시된 바와 같이 실험기간 중 시간대별 평균풍속은 3.97 m s^{-1} 으로 기록될 만큼 적당히 높은 풍속이 유지되었다. 기온의 경우 평균 12.4°C 로 4월 초 봄 기간에 적당히 높은 상태를 유지하였다. 이에 반해 SO_2 , CO , PM 등의 환경오염물질들은 연구대상지역의 비교적 청정한 조건을 적절히 반영하는 수준으로 나타났다. 특히 분진의 경우, 황사가 중단된 데 따른 영향으로 인해 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 질량농도는 각각 46.6 과 $60.7 \mu\text{g m}^{-3}$ 를 기록하였다. 전체 실험기간 중의 시간별 풍향자료를 이용하여, 16방위로 구분된 sector별 바람의 절대 발생 빈도를 비교하였다. 실험 기간 중에는 전체적으로 서풍과 북동풍이 주를 이루었다. 이를 다시 낮기간과 밤기간으로 구분하면, 낮에는 남서 및 북동풍이 주를 이루고, 밤에는 북동풍이 주를 이루었다.

2.2 메탄의 농도, 농도구배, 플럭스 측정

메탄 플럭스의 측정은 에디공분산 방식으로 구한 열과 운동량의 난류교환계수를 메탄의 농도구배에 직접적으로 연계하여, 플럭스를 산출하는 미기상학적 기법의 하나인 지표층구배방식 (the surface layer gradient method)을 이용하였다. 이와 같은 실험방식은 이미 고속센서 (fast response sensor)의 활용이 곤란한 수은과 같은 극미량성분의 플럭스산출에 다양하게 응용된 바 있다 (Meyers *et al.*, 1996). 그리고 본 연구가 시도된 하리지역에서는 이미 2002년 봄철에 이와 같은 기법을 활용한 바 있다 (Kim *et al.*, 2002). 이를 요약하면 다음과 같다. 양 실험기간 중 토양 상층부에 형성되는 메탄의 농도구배와 플럭스

를 측정하기 위해, 지표면상의 두 고도-1과 5 m 높이-에서 매 시간 당 24시간 연속으로 메탄의 농도를 측정하였다. 각각의 높이를 대표하는 메탄의 농도는 일본 기모토전자(주)의 탄화수소자동측정기인 모델HA-675두 기를 동시에 사용하였다. 이 장비는 MACSAM-6 (Microcomputer system of air pollutants monitoring) 시스템의 컴포넌트 파트로 내장되어 있는 기기이며, 간편하게 운영할 수 있는 가스크로마토그래피법 (GC-FID) 검출에 의한 대기환경 중의 메탄 (CH_4), 총탄화수소 (THC) 및 비메탄계탄화수소 (NMHC)를 연속측정 기록한다. 또한 마이크로컴퓨터에 의한 작동제어와 데이터처리 및 고장진단기능을 갖고 있다. 최소검출감도와 정량하한치는 5회 이상 측정된 정량하한치의 표준편차 값에 각각 3배 및 10배 값으로 결정하였다. 이와 같은 방식에 의하면, 본 기기의 검출하 한치는 0.03 ppmC 그리고 정량하한치는 0.10 ppmC 로 나타났다: 따라서 0.10 ppmC 이상의 농도는 유효수치로 간주할 수 있다. 본 기기의 측정범위는 $0 \sim 10$, $0 \sim 20$, $0 \sim 50 \text{ ppm}$ 의 3가지에서 선택할 수 있고, 반복재현성은 전 측정범위의 1% 이하이다. 안정성과 관련한 제로드리프트는 $\pm 1\%/24$ 시간이며, 스파드리프트는 $\pm 2\%/24$ 시간 이내이고, 직선성역시 전측정범위의 $\pm 2\%$ 이내를 기록한다.

메탄의 플럭스를 산출하기 위해 지표면상 2개의 높이로부터 메탄의 농도구배를 구하고, 이를 오염물질의 수송에 관여하는 난류 교환 계수 (K)와 연계하였다. 풍속, 온도, 현열, 잠열과 같은 스칼라량의 난류수송 기작이 동일하다고 가정하면, 열에 대한 난류 교환 계수 (K_H)를 이용하여 메탄의 플럭스를 산출할 수 있다. 본 연구기간 중 메탄의 측정 지점으로부터 100 m 이내의 거리에 10 m 높이로 설치한 4개의 타워에서 풍속, 온도, 현열, 잠열, 이산화탄소, 운동량 플럭스 등을 에디 공분산 방법으로 측정하였다. 메탄의 농도구배가 관측된 1과 5 m 높이의 열에 대한 평균 난류 교환 계수는 두 지점의 기하학적 평균인 2.53 m 높이에서 K_H 를 측정하였다. 이에 대한 객관성을 확보하기 위해 K_M 값도 동시에 측정하고, 보정자료로 활용하였다.

2.3 농도구배의 검정

메탄의 교환현상은 지상으로부터 대기로의 배출

(+) 또는 대기로부터 지상으로 건조침적(-)과 같이 수직적인 방향성을 부여할 수 있다. 이와 같은 교환현상의 방향을 설정하기 위해, 하단과 상단 사이에 존재하는 미세한 농도차의 '양(+)/음(-)'의 유무를 기준으로 배출이나 건조침적을 구분한다. 그런데 본 연구에서 발견되는 미세한 농도차이(또는 농도구배)로 방향성을 설정한다는 것이 얼마만큼 의미가 있는가를 검토하는 것이 중요하다. 이를 검토하기 위한 한 가지 방법으로 Kim and Kim (1999)이 과거 수온에 대한 연구방식에 이미 응용한 바 있는 '농도구배의 %값'을 일종의 기준으로 활용하였다.

$$\text{Percent gradient (PG)} = \left\{ \frac{|\Delta C_{CH_4}|}{C_{CH_4}(\text{Lower height of 1 m})} \right\} \times 100$$

여기에서 ΔC_{CH_4} 와 $C_{CH_4}(1\text{ m})$ 은 각각 두 고도간 메탄농도의 차이(농도구배) 및 1 m 고도의 농도를 의미한다. 이를 측정방식에 내재된 정밀도와 비교하는 방식으로 방향성의 신뢰도를 간접적으로 평가할 수 있는 기준으로 활용하였다(Kim and Kim, 1999).

표 2에 제시된 바와 같이, 본 연구기간 중 두 고도에서 메탄의 농도는 최대 158회에 걸쳐 관측이 이루어졌다. 그런데 이들 158개의 자료 중 3개는 양 고도간의 등농도 문제(N=1)와 상단자료의 유실(N=2)로 인해, 양고도간의 농도구배를 산출할 수 없었다. 방향성이 부여된 155개의 자료에 대한 수직적 교환방향을 감안하면, 배출이 44.5% (=69/155) 침적이 55.5% (=86/155)로 구분되었다. 수직적 방향성을 가진 모든 자료들에 대해서 PD 값을 산출한 결과는 다음과 같다. 배출시 PG 값의 평균은 1.43%를 기록한 반면, 침적시에는 1.03%로 낮게 나타났다. 배출 및 건조침적에 대한 PG 값의 빈도분포를 비교한 결과, 방향성에 상관없이 대부분 PG 값이 1% 조금 초과하는 수준으로 나타났다. 그런데 실제로 채취 및 분석에 사용된 측정기기 두 대를 동시에 같은 조건으로 등고도에서 24시간동안 연속 가동하여 상대정밀도를 계산한 결과 0.15%로 나타났다. 만약에 각각의 고도에서 최대 0.15%의 오차가 발생한다면, 양 고도의 농도차로 정의되는 농도구배의 최대오차는 대략 0.3%를 넘지 않을 것이다. 따라서 농도구배의 신뢰성을 검토하기 위한 엄격한 기준으로 PG 값 0.3%를 설정할 경우, 배출자료의

Table 2. A statistical summary of CH₄-related data sets and relevant parameters for its flux quantification.

	CH ₄ (L) ppb	CH ₄ (U) ppb	ΔCH ₄ ppb	K m s ⁻¹	Flux mg m ⁻² h ⁻¹
A. All data sets					
Mean	1815	1812	1.945	0.060	0.150
Median	1798	1791	-2.666	0.062	-0.183
SD	98.91	90.83	32.84	0.034	7.000
Min	1614	1678	-115.9	0.008	-22.78
Max	2178	2183	152.3	0.131	32.82
N	158	156	155	116	112
CI(90%)	13.02	12.03	4.365	0.005	1.097
B. Upward emission events					
Mean	1830	1803	26.83	0.057	5.535
Median	1828	1791	15.05	0.057	4.325
SD	86.90	77.16	29.09	0.030	6.031
Min	1691	1688	0.204	0.009	0.080
Max	2158	2152	152	0.124	32.82
N	69	69	69	47	47
CI(90%)	17.45	15.49	5.839	0.007	1.477
C. Downward dry deposition events					
Mean	1801	1819	-18.02	0.060	-3.744
Median	1779	1791	-12.39	0.063	-2.544
SD	106.3	100.7	19.25	0.035	4.706
Min	1614	1678	-115.9	0.008	-22.78
Max	2178	2183	-0.981	0.131	-0.048
N	86	86	86	65	65
CI(90%)	19.06	18.06	3.452	0.007	0.974
D. Data without vertical direction					
Mean	1781		0.104		
Median	1915		0.105		
SD	104.8		0.020		
Min	1750		1781		
Max	1944		1781		
N	3	1	4		
CI(90%)	176.8		0.024		

69.8% (=60/86)과 침적자료의 72.5% (=50/69) 이상(또는 배출과 침적에 구분없이 전체 자료의 71% (=110/155))의 관측자료로부터 확인한 수직적 방향성은 통계적으로 유의한 것으로 간주할 수 있다.

3. 결과 및 토론

3.1 전체 결과 및 메탄의 시간적 분포특성

본 연구기간 중 매 시간별로 관측된 메탄의 농도

(하층 1 m 기준), 농도구배, 교환율을 그림 1에 시간의 함수로 비교하였다. 메탄의 농도는 전체 실험기간 동안 1800 ppb 전후의 농도가 일정한 규모로 변화하는 양상을 보였다. 보다 구체적으로 평균치인 1810 ppb대를 중심으로 최저농도 1614와 최고농도 2183 ppb까지의 분포를 띠었다. 이와 같은 농도변화의 진폭은 평균농도의 30% 범위에 해당하는 수준인데, 이웃 나라인 일본지역에서 행해진 연구에서도 유사한 경향이 확인된 바 있다(Tohijima *et al.*, 2002). 그림 2에 제시된 바와 같이 실험이 이루어진 기간에 대한 유적선 분석결과와 연계하여, 메탄의 농도를 비교하면 기간대별로 상당히 다양한 경향이 나타난다. 특히 실험의 초기 시점(4/24일 오전까지)에 1900 ppb를 초과하거나 근접하는 고농도의 메탄이 발견되었다. 공기계의 유동경로를 보면, 이 시점의 고농도는 중국대륙의 배출원에 의한 영향이 상당히 나타나는 것으로 보였다. 그 이후로는 1800 ppb에 가까운 일반적인 수준의 농도가 4/27일까지 지속되었다. 그런데 이 기간 중 일시적으로 1600 ppb에 가까운 저농도의 관측이 일시적으로 4/25(JD=115)와 4/26(JD=116) 일에 나타난 것은 유의할 필요가 있다. 이 기간은 공기계의 유동이 한반도 북쪽지역에 상당히 길게 정체된 것으로 확인되었다. 1600 ppb에 가까운 저농도의 발현은 이 기간 중 CH₄를 효과적으로 산화시키는 과산화수소 라디칼이 풍부한 공기계와 접촉이 있었을 가능성이 높은 것으로 사료된다. 이 기간 뒤로는 4/27일부터 주로 동해 및 일본 지역을 통해 공기계의 유입이 지속적으로 이루어진 것이 특징이다. 2000 ppb를 초과하는 고농도의 메탄이 4/27일 또는 4/29일을 전후로 일정 시간 이상 나타났다. 그런데 이 기간은 일본 남부 지역을 통과한 공기가 주로 유입된 것으로 나타났다. 이러한 점들을 감안할 때, 일본 남부지역의 농경활동 또는 기타 인위적 배출원과 연계된 영향을 고려해 볼 수도 있을 것으로 보인다. 최근에 영국의 런던과 같이 다양한 배출원의 영향을 받는 지역에 대한 심층연구에서도, 메탄의 농도가 큰 규모로 변화하는 것이 확인된 바 있다(Lowry *et al.*, 2001).

농도구배나 플럭스는 농도의 시간적 분포경향과 상당히 다른 특성을 보여 주었다. 실험 초기에 절대값 10 mg m⁻² h⁻¹를 초과하는 강한 배출 및 침적 플럭스가 확인되었지만, 4/26일 이후로는 배출이나 침

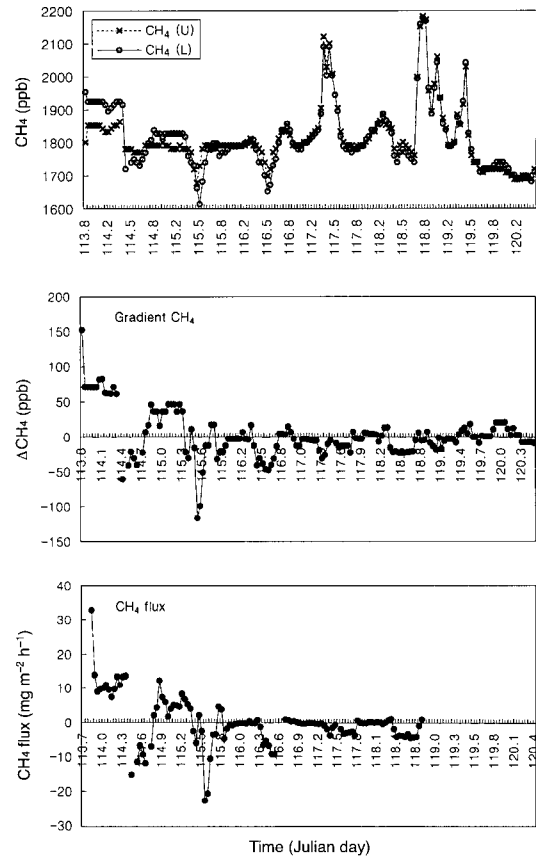


Fig. 1. Plots of temporal variabilities of CH₄-related parameters (concentrations, gradients, and fluxes) measured during the whole study period of late April.

적 플럭스 모두 그 크기가 현저하게 감소되고 변화의 폭도 좁게 나타났다. 표 2에 제시된 바와 같이, 메탄의 수직적인 농도분포는 양 고도에서 상당히 균질한 상태를 유지한 것으로 나타난다. 전체 연구기간 동안 하단(1 미터) 높이에서 1815 ppb의 평균농도를 보인데 반해, 상단(5 미터)에서는 이보다 근소하게 줄어든 수준인 1812 ppb를 기록하였다. 표 2에 제시된 바와 같이 다시 배출과 전조침적으로 자료집단을 구분하면, 양 고도를 대표하는 평균농도의 차이가 조금 더 확대되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 차이로 인해, 농도구배의 평균값에 대한 크기도 배출시 27 그리고 침적시 -18 ppb 수준으로 농도값의 1% 수준에 가깝게 나타난다. 수직방향의 플

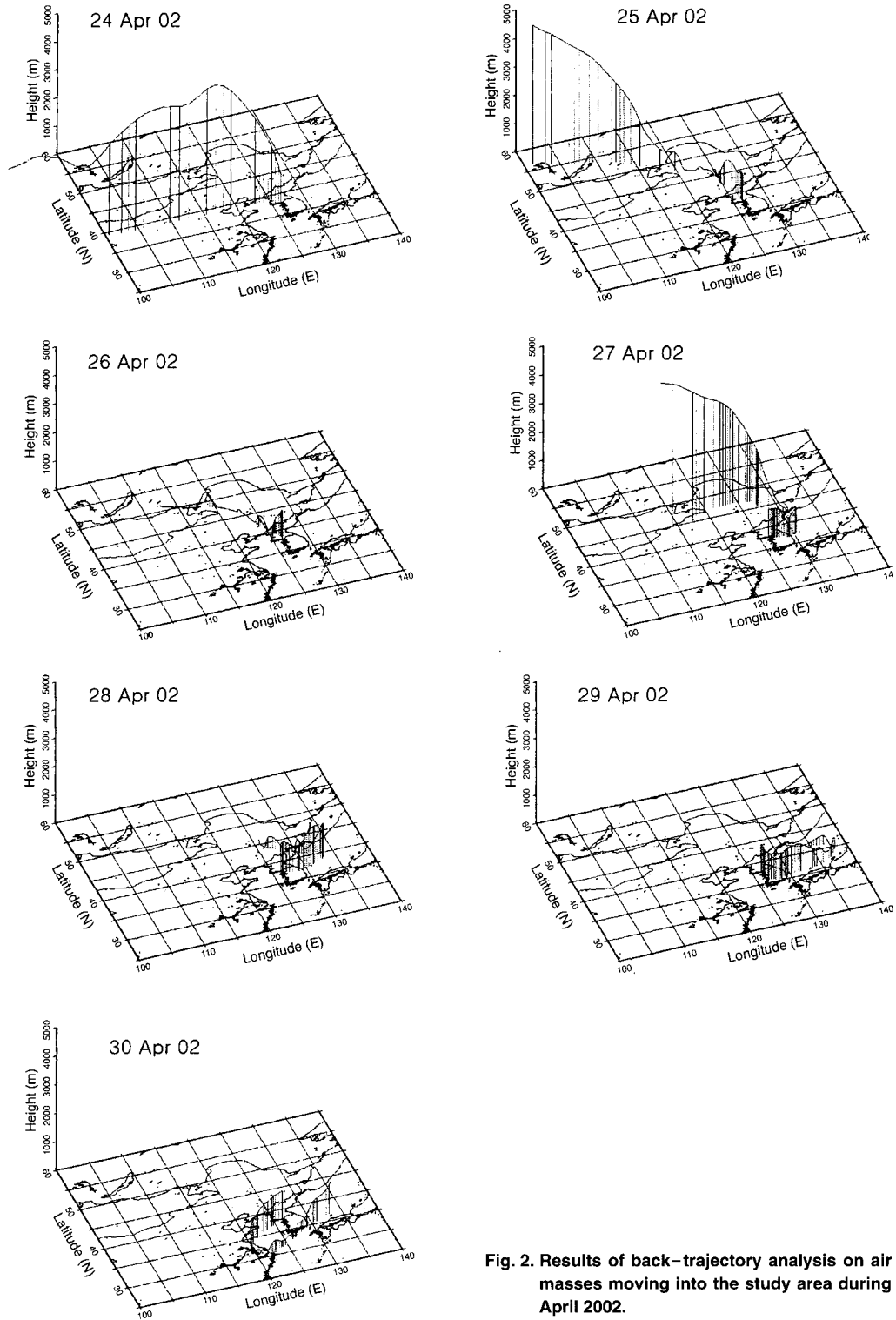


Fig. 2. Results of back-trajectory analysis on air masses moving into the study area during April 2002.

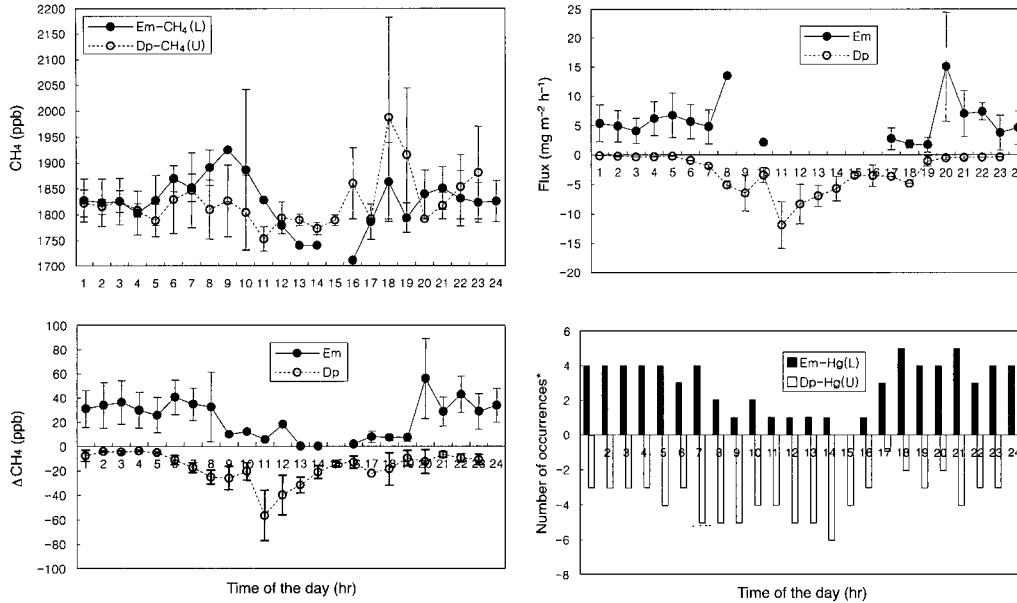


Fig. 3. Diurnal variabilities of CH₄ concentration, gradient, flux, and frequency distribution based on hourly measurement during the whole study period.

력스를 비교하면, 양방향간에 어느 정도 차이가 나타난다. 배출 플럭스의 경우 평균 $5.54 \pm 6.03 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 나타났는데 반해, 침적 플럭스는 $-3.74 \pm 4.71 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 확인되었다. 이와 같은 결과는 토양표면은 단순히 메탄의 배출원으로서 기능할 뿐 아니라 동시에 소멸원으로서도 기능을 한다는 점을 확인시켜 준다. 토양환경이 메탄의 배출원으로 작용한다는 사실은 비교적 잘 알려져 있다. 그러나 토양이 소멸원으로 작용하는 현상의 경우, 토양표면이 메탄을 산화시키는 능력을 동시에 내재한 사실로 설명이 된다. 대기 중의 메탄은 주로 과산화수소기와 반응하여 소멸되지만, 후자와 같은 소멸경로도 전체의 5% 정도를 설명할 수 있는 것으로 밝혀지고 있다 (IPCC, 1995). 배출율에 대한 자료에 비해 침적율에 대한 자료는 상대적으로 희소하지만, 초지지역에 대한 선행연구들의 결과를 보면 대략 $-54 \sim -18 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 정도의 침적율을 보이는 것으로 보고되고 있다 (Mosier *et al.*, 1996; Tate and Striegel, 1993; Minami *et al.*, 1993). 본 연구의 경우, 양 방향의 발생빈도를 감안하여, 연구대상지역의 실질적인 메탄의 교환율을 도출하면 $0.15 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 에 해당한다. 따

라서 전체적으로 침적의 발생빈도가 높았음에도 관측대상지역의 경우, 연구기간동안 실질적으로 메탄을 배출하는 배출원으로 작용하였다고 판단할 수 있다.

3.2 하리 지역을 중심으로 메탄의 교환작용을 조절하는 메커니즘

그림 3에서는 메탄과 직접적으로 연관된 변수들(농도, 농도구배, 플럭스)에 대한 양쪽 수직방향의 24시간 주기 경향성을 비교하였다(그런데 플럭스의 경우, 관측시스템의 문제로 인해 일부 자료의 유실이 따랐다). 그림에 제시된 것과 같이 메탄의 농도는 배출이나 침적에 상관없이 모두 오전 8, 9시경과 18, 19시의 이른 저녁 시간대에 고농도를 취하고, 오후 14시경에 1800 ppb 이하의 가장 낮은 농도대를 유지하는 것으로 나타났다. 이에 반해 농도구배나 플럭스의 경우, 배출과 침적자료간에는 비교적 뚜렷한 구분이 가능한 것으로 나타났다. 배출의 경우 농도분포와 유사하게 오전과 이른 저녁시간대에 최고치를 기록하지만, 반면 오후 시간대에 가장 낮은 배출율을 유지하는 경향성을 보이는 것으로 나타났다. 메탄의 경우 농도분포가 배출원의 영향을

Table 3. Results of correlation analysis between the CH₄-related parameters and the relevant environmental parameters measured concurrently: The whole data sets are compared after being grouped into: (A) the upward emission and (B) the downward deposition events.

	K	CH ₄ (L)	CH ₄ (U)	ΔCH ₄	CH ₄ Flux	K	CH ₄ (L)	CH ₄ (U)	ΔCH ₄	CH ₄ Flux
	(A) Emission data sets					(B) Deposition data sets				
CH ₄ (L)	0.094	(69)				-0.280	(86)			
CH ₄ (U)	-0.060	0.944 ^{III}	(69)			-0.185	0.984 ^{III}	(86)		
ΔCH ₄	0.313	0.483 ^{III}	0.168	(69)		-0.458 ^{II}	0.372 ^{II}	0.201	(86)	
CH ₄ Flux	0.500 ^{II}	0.433 ^I	-0.004	0.930 ^{III}	(47)	-0.633 ^{III}	0.500 ^{III}	0.295	0.952 ^{III}	(65)
SO ₂	-	-	-	-	-	0.292	-0.110	-0.042	-0.388 ^{II}	-0.382 ^I
NO	0.501 ^{II}	0.013	0.082	-0.177	-0.113	0.232	0.075	0.099	-0.101	-0.154
NO ₂	-0.233	0.339 ^I	0.533 ^{III}	-0.402 ^{II}	-0.443 ^I	0.032	0.724 ^{III}	0.728 ^{III}	0.186	0.210
NO _x	-0.173	0.310	0.498 ^{III}	-0.394 ^{II}	-0.445 ^I	0.104	0.630 ^{III}	0.644 ^{III}	0.109	0.107
NMHC	0.060	-0.181	-0.217	0.035	-0.234	-0.107	-0.156	-0.131	-0.174	0.060
THC	0.391 ^I	0.431 ^{II}	0.479 ^{III}	0.017	0.119	0.272	0.591 ^{III}	0.644 ^{III}	-0.107	-0.268
O ₃	0.242	0.055	0.102	-0.107	-0.178	0.418 ^{II}	-0.083	-0.059	-0.151	-0.144
CO	-0.258	0.684 ^{III}	0.679 ^{III}	0.236	-0.166	-0.150	0.536 ^{III}	0.579 ^{III}	-0.065	0.222
CO ₂	-0.466 ^{II}	0.122	0.444 ^I	-0.575 ^{III}	-0.538 ^{III}	-0.203	0.359 ^I	0.385 ^I	0.024	0.127
PM2.5	-0.026	0.663 ^{III}	0.718 ^{III}	0.075	-0.093	0.289	0.523 ^{III}	0.560 ^{III}	-0.038	-0.203
PM10	0.117	0.643 ^{III}	0.693 ^{III}	0.080	-0.040	0.292	0.454 ^{III}	0.496 ^{III}	-0.091	-0.264
UV	0.381 ^I	-0.077	-0.003	-0.221	-0.159	0.776 ^{III}	-0.338 ^I	-0.238	-0.618 ^{III}	-0.671 ^{III}
RH	-0.587 ^{III}	-0.342 ^I	-0.298	-0.231	0.135	-0.773 ^{III}	0.170	0.089	0.476 ^{III}	0.572 ^{III}
WS	0.941 ^{III}	0.146	0.059	0.280	0.535 ^{II}	0.862 ^{III}	-0.192	-0.144	-0.304 ^I	-0.476 ^{III}
TEMP.	0.109	0.049	0.133	-0.205	0.100	0.412 ^{II}	0.162	0.178	-0.037	-0.099

Superscripts I, II, and III denote P values less than 10⁻², 10⁻³ and 10⁻⁴, respectively.

어느 정도 반영하듯이, 농도와 배출원의 일주기 경향간에도 상당한 수준의 연계성을 유지하는 것으로 사료된다. 반면 침적의 경우, 배출에 비해 24시간 연속으로 자료관측이 가능하였으며, 최고 침적율은 오후 12시경에 나타나는 것으로 확인되었다. 이와 같이 배출율 또는 침적율의 크기 변화와 같이, 이들의 발생빈도도 시간적 경향성이 상당히 높은 일관성을 취하는 것으로 나타났다.

연구대상지역을 중심으로 이루어지는 메탄의 교환현상을 보다 정확하게 진단하기 위한 방편으로 동시에 관측이 이루어진 주요 변수들과 환경인자들의 관계를 상관분석을 통해 분석해 보았다. 그 결과 양 기간대에는 상당 수준의 유사성 및 차별성이 동시에 확인되었다. 표 3에 제시된 양 기간대의 결과를 효과적으로 비교하기 위해, 상관성의 강도(P < 10⁻², 10⁻³, 10⁻⁴)를 임의의 기준으로 활용하여, 개별적으로 구분하였다. 이를 토대로 양 기간에 확인된 상관성의 강도로 이들의 경향성을 비교해 보았다. 배출자료의 경우, 총 29개의 비교구에서 강한 상관

성을 보이는 것으로 나타났다. 반면 건조침적의 경우, 총 34개의 비교구에서 이러한 결과가 나타났다. 특히 가장 상관성의 강도가 강한 경우(P < 10⁻⁴)만을 비교해 보아도, 배출시 16회와 침적시 24회로 이러한 경향성이 일관성있게 확인되었다.

배출과 침적으로 구분된 플럭스자료에 대한 상관성의 경향을 보면, 양자간에 상당한 차이가 나타난다. 배출의 경우, 일반적으로 예상할 수 있는 것보다 같이 풍속과 강한 양의 상관관계를 유지하는 것으로 나타났다. 반면 토양의 온도가 메탄의 배출율과 강한 상관성을 보인다는 과거의 연구결과들에 비해서는 큰 차이가 나타난다. 주로 기온의 상승은 메탄의 생성과 배출을 촉진하는 방향으로 작용할 수 있는데, 습지 등을 중심으로 이루어진 연구들은 그 효율이 30~32°C에서 최적인 것으로 밝혀지고 있다 (Parashar *et al.*, 1993). 그런데 본 연구가 이루어진 4월 기간 중 기온의 변화가 6.3~21.2°C에 머무른 점을 감안하면, 연구지역의 토양온도변화가 배출율에 직접적으로 영향을 미칠 정도는 아닌 것으로 의

심된다. 그리고 이와 같은 기상인자들 외에 NO₂, CO₂ 등을 위시한 가스상 오염물질들과 강한 연계성을 확인할 수 있는데, 특히 이들과 배출플럭스는 이들의 농도와 강한 음의 상관관계를 형성하는 것으로 나타났다. 이들의 농도가 메탄의 플럭스와 상대적으로 약한 양의 상관성을 보이는 것과는 대조적이다. 반면 침적 플럭스의 경우, SO₂와 같은 가스상 오염물질과 일정하게 음의 상관성을 보이지만, 주로 기상인자들과 대단히 유의한 수준의 상관성을 유지하는 것으로 발견되었다. 풍속 및 일사량과 강한 음의 상관성을 그리고 상대습도와는 강한 양의 상관성을 유지하는 것으로 나타났다. 특히 본 연구에서 확인된 풍속과 침적률과의 강한 상관성의 확인은 초지를 대상으로 풍속과 메탄의 침적률간에 상관성을 분석한 Yonemura *et al.* (2000)의 결과와는 상당한 차이를 보인다. 이들은 측정방식의 정밀도 문제로 정밀한 측정에 상당히 곤란을 겪은 바 있다. 또한 본 연구의 결과와 달리, 이들의 연구에서는 메탄의 침적과 풍속간에 특별한 상관성의 존재를 확인할 수 없었다.

4. 결 론

한반도 서해안의 청정지역에 근사하는 강화도 하리지역을 중심으로 메탄의 대기-지표간 교환율을 2001년 4월 말기간에 관측하였다. 이러한 관측을 위해 미기상학적 방식을 적용하였는데, 1과 5미터의 양고도에서 형성되는 미세한 농도구배(양 고도간의 농도차이는 농도에 대비할 경우, 평균 1% 수준)의 통계적인 신뢰성을 확보하기 위해 이들 자료에 대한 세부적인 검정을 시도하였다. 그 결과 농도구배가 계산된 총 155회의 관측 중 약 70%의 자료는 이러한 농도차이에 통계적인 의미를 부여할 수 있었다. 메탄의 플럭스 관측은 하리의 농경지를 중심으로 이루어졌지만, 연구가 시도된 기간은 벼가 자라기 이전(농경활동이 시작되기 전)의 시점이라, 대체로 수 ng m⁻² h⁻¹의 약한 규모의 배출과 침적이 동시에 관측되었다. 연구대상지역에서 관측된 메탄의 수직적 교환현상은 비교적 다양한 물리적(풍속 등) 또는 화학적 인자(NO₂, CO₂ 등)의 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구가 제한적 기간 동안 시도

되어, 일반적으로 발견되는 기온과 같은 변수와 배출과 직접적 관계를 확인하기는 어려웠다. 그러나 전체 연구기간 동안 메탄의 농도변화는 공기계의 유입양상과 연계된 경향을 보였다. 전체적으로 본 연구가 이뤄진 기간은 모종이 되지 않은 농경지의 조건이 유지되어, 메탄의 배출이나 침적은 과거에 관측된 여타 주요 지표환경에서 관측된 결과보다 상대적으로 낮게 나타났다. 그리고 전체적으로 침적의 발생빈도가 더 높게 나타났지만, 연구가 이뤄진 하리의 농경지역은 하루동안 약 3.6 mg m⁻² 규모의 메탄을 배출하는 배출원으로 작용한 것으로 나타났다. 농경지와 같은 주요 배출원의 배출 또는 침적과 같은 교환특성을 보다 세밀하게 진단하고, 강한 교환규모에 대한 대표성이 강한 정량적인 정보를 제시하기 위해서는 경작조건의 변화에 맞추어 지속적인 관측을 연장하는 노력이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2002년 한국과학재단의 세계적 선도과학자 연구지원과제에 의하여 이루어졌습니다. 연구자료의 세부적인 분석에 노고를 아끼지 않은 김나영 양에게 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- International Panel on Climate Change (1995) Climate Change 1994: Radiative forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios, Cambridge Univ. Press, New York.
- Khalil, M.A.K. and R.A. Rasmussen (1990) Atmospheric methane: recent global trends. *Env. Sci. Technol.* 24, 549-553.
- Kim, K.-H. and M.-Y. Kim (1999) The exchange of gaseous mercury across soil-air interface in a residential area of Seoul, Korea *Atmospheric Environment*, 33, 3153-3165.
- Kim, K.-H., M.Y. Kim, J. Kim, and G. Lee (2002) The concentrations and fluxes of total gaseous mercury in a western coastal area of Korea during the spring period, 2001. *Atmospheric Environment*, 36(21), 63-77.

- Lowry, D., C.W. Holmes, N.D. Rata, P. O'Brien, and E.G. Nisbet (2001) London methane emissions: Use of diurnal changes in concentration and $\delta^{13}\text{C}$ to identify urban sources and verify inventories. *J. Geophys. Res.* 106(D7), 7427-7448.
- Meyers, T.P., M. Hall, S.E. Lindberg, and K.-H. Kim (1996) Use of the MBR technique to measure fluxes of trace species. *Atmospheric Environment*, 30(19), 3321-3329.
- Minami, K., J. Goudriaan, E.A. Lantinga, and T. Kimura (1993) Significance of grasslands in emission and absorption of greenhouse gases. *Proc. Of the XVII International Grassland Congress*, pp. 1231-1238.
- Mosier, A., W.J. Parton, D.W. Valentine, D.S. Ojima, D.S. Schimel, and J.A. Delgado (1996) CH_4 and N_2O fluxes in the Colorado shortgrass steppe: 1. Impact of landscape and nitrogen addition. *Global Biogeochemical Cycles* 10, 387-399.
- Parashar, D.C., P.K. Gupta, J. Rai, R.C. Sharma, and N. Singh (1993) Effect of soil temperature on methane emission from paddy field. *Chemosphere* 26, 247-250.
- Tate, C.M. and R.G. Striegel (1993) Methane consumption and carbon dioxide emission in tallgrass prairie: effects of biomass burning and conversion to agriculture. *Global Biogeochemical Cycles* 7, 735-748.
- Tohjima, Y., T. Machida, M. Utiyama, M. Katsumoto, Y. Fujinuma, and S. Maksyutov. (2002) Analysis and presentation of in situ atmospheric methane measurements from Cape Ochi-ishi and Hateruma Island. *J. Geophys. Res.* 107(D12), 10.1029.
- Yonemura, S., A. Miyata, and M. Yokozawa (2000) Concentrations of carbon monoxide and methane at two heights above a grass field and their deposition onto the field. *Atmos. Environ.* 34, 5007-5014.