

무안지역 메탄가스의 단주기적 농도변화에 대한 평가

최규훈¹ · 윤용훈² · 김기현^{1,*} · 강창희³ · 조영민⁴

¹세종대학교 지구정보과학과, 143-747 서울특별시 광진구 군자동 98

²기상연구소 지구대기감시관측소, 357-961 충청남도 태안군 안면읍 승언리 1764-6

³제주대학교 화학과, 690-756 제주도 아라1동 산 1

⁴경희대학교 환경응용화학부, 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

Studies of Short-Term Variability of Methane in the Moo-Ahn Observatory Site in Korea

Gyoo-Hoon Choi¹ · Yong-Hoon Youn² · Ki-Hyun Kim^{1,*}

Chang-Hee Kang³ · Young-Min Jo⁴

¹Department of Geoinformation Sciences, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

²Korea Global Atmosphere Watch Observatory, Meteorological Research Institute, Chung-Nam 357-961, Korea

³Department of Chemistry, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea

⁴School of Environment & Applied Chemistry, Kyunghee University Yongjin, Kyunggi-do, 449-701 Korea

Abstract: In this study, the short-term variability of methane concentrations were investigated over 24-hr scale. The data obtained from the Moo-Ahn (MAN) station located in the western coastal area of Korea were analyzed from various respects to describe its distribution characteristics over short term scale. The MAN data were compared with those obtained from the two major background observatory sites: Point Barrow (Alaska) and Mauna Loa (Hawaii). The mean concentration of methane for the whole study period, when computed using the daily mean values, was found to be 1898 ± 85.3 ppb ($N = 812$). The mean values for the two comparable sites were observed to be 1832 ± 29.6 ppb ($N = 823$) for Point Barrow and 1745 ± 14.8 ppb ($N = 818$) for Mauna Loa. According to the analysis of frequency distribution, the mode value for the MAN area is found to be 1900 ppb, but the mean concentration for Point Barrow and Mauna Loa are shown to have relatively low values of 1850 and 1750 ppb, respectively. When examined over diurnal scale, the CH₄ data for the MAN area exhibit a rather consistent trend; CH₄ level is low during the daytime (after 6:00 A.M) and rises during the nighttime. The findings of the generally enhanced methane concentration in the MAN station may be explained from various respects. One of the most important reasons is that the MAN area is under the influence of various source processes relative to all the other stations under consideration. The short-term distribution patterns for the MAN station are hence characterized not only by the high methane concentration but also by the high oscillation in its CH₄ concentration level.

Key words: methane, greenhouse gas, the Korean Peninsula, emissions, distribution characteristics.

요약: 본 연구에서는 전남 무안지역을 중심으로 관측한 농도자료와 세계의 주요 배경관측지점인 Point Barrow (Alaska), Mauna Loa(Hawaii)를 중심으로 관측한 농도자료를 이용하여, 메탄의 농도분포특성을 지역 또는 시간의 함수로 비교분석하였다. 이들 관측점들은 주요 위도대를 대표하기 때문에, 위도별 메탄의 분포특성을 파악하는 데도 중요한 단서를 제공하였다. 또한 본 연구결과에 기초하여 메탄의 농도변화양상을 여러 가지 시간적 주기로 비교하고, 그러한 결과의 의미를 다양한 통계적 기법에 기초하여 분석하였다. 전체 관측기간동안 확보된 일평균 농도자료로부터 계산된 무안지역의 농도는 1898 ± 85.3 ppb($N = 812$)로 나타났다. 동일한 기간동안 두 개의 비교관측지점인 Point Barrow와 Mauna Loa 지역에서는 1832 ± 29.6 ppb($N = 823$), 1745 ± 14.8 ppb($N = 818$)의 평균농도가 각각 관측되었다. 각 지점에서

관측된 자료를 이용하여 빈도분포를 비교한 결과에 따르면, 무안지역에서 1900ppb의 최빈값을 나타낸 반면, Point Barrow, Mauna Loa 지역에서는 각각 1850, 1750ppb로 (상대적으로) 낮은 최빈값을 보여 주었다. 이 논문에서는 국내의 관측점에서 발견되는 고농도의 메탄분포특성을 여러 관점에서 비교하고 해석하고자 하였다. 국외지역에서 주로 발견되는 미미한 수준의 농도변화 경향과 달리, 무안지역에서는 여타 지역들에 비해 절대적으로 높은 농도값이 유지되고 그 농도변화가 주야간대별로 뚜렷하게 구분될 정도로 주기적인 변화의 폭이 큰 것으로 확인되었다. 특히 무안지역에서는 낮시간대(6:00 AM 이후)에 농도가 낮아지고, 저녁시간대에 농도치가 상승하는 경향이 두드러졌다. 풍향과 CH₄ 농도관계를 비교한 결과, 연구대상지역이 서해안에 위치한 지리적인 요건으로 인해 상대적으로 청정한 해풍이 주를 이루는 서풍계열의 풍계가 나타날 때, CH₄의 농도는 낮은 수준을 유지하는 것으로 나타났다. 본 연구에 의하면, 국내 지점의 메탄농도는 국외여타 지점에 비해 뚜렷하게 구분이 될 정도로 높은 수준을 유지하고 있다. 이러한 현상을 초래하는 원인으로서는 여타 비교대상지역들에 비해, 무안지역이 보다 다양한 배출원의 영향에 직접적으로 노출된데 따른 영향을 직간접적으로 반영하는 결과로 사료된다. 연구지점에서 발견된 CH₄의 고농도 현상과 일주기를 중심으로 반복되는 농도의 큰 진동폭이 나타나는 현상도 역시 주목할 만하다.

주요어: 메탄, 온실기체, 한반도, 배출원, 분포특성

서 론

지구온난화현상은 그 결과를 예측하기 힘들 정도로 광범위한 기상이변을 일으킬 수 있는 잠재력을 지닌 것으로 보고되고 있다(전의찬, 1997). 특히 지구의 평균온도 상승, 해수면 상승, 사막화 현상, 생태계변화 등과 같은 환경변화의 현상은 이러한 문제의 총체적인 표현이라고 할 수 있다(기상청 기상연구소, 1998). 따라서 이러한 현상은 지구환경의 파괴를 우려하는 과학자들에게 가장 심각한 환경문제로 대두되고 있다. 인류의 산업활동 증가로 야기되고 있는 화석연료의 사용증가와 이로 인해 초래된 지구온난화현상은 지속적으로 그 심각성을 더해가는 추세이다. 최근 한반도에서도 기후변화의 경향이 점차 강하게 나타나고 있어 많은 관심을 불러일으키고 있다. 폭우·폭설의 빈번한 발현 또는 온난한 기온의 지속 등이 불규칙하게 나타나는 현상 등은 우리 나라의 대표적 기후특성으로 간주되는 4계절의 구분을 점차 모호하게 하는 것으로 해석되기도 한다(기상청, 1999). 기상관측을 시작한 1908년 이래 우리 나라의 연평균기온은 불규칙적이거나 꾸준히 상승한 것으로 나타났다. 1908년부터 1940년까지 대체로 연평균기온이 10~11°C 사이를 유지하였으나, 1970년대부터 최근까지는 12~13°C 사이를 나타내는 등, 완만하지만 지속적인 상승세가 이어지고 있다(기상청, 1999). 한반도에서도 발견되는 이와 같은 기후변화의 경향성은 인간활동에 의한 지구온난화의 영향이 가시화되는 과정의 한 단면을 보여주는 것이라고도 할 수 있겠다.

지구온난화를 유발하는 온실기체로는 이산화탄소

(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 염화불화탄소(CFCs), 오존(O₃) 등이 주목받고 있다(전의찬 외, 1997). 이들 기체들 중 CO₂는 전지구적인 규모로 온난화의 기여도가 55%에 달할 정도로 중요한 것으로 판명되고 있다(기상청, 1997). 이에 반해 CH₄와 같은 성분의 경우, CO₂와 직접적인 비교를 하기에는 양적으로 또는 규모적으로 부족하다. 그러나 개별분자의 기여도만을 감안할 경우, CO₂ 분자의 22~30배에 달할 정도로 온실효과의 강도가 큰 것으로 알려져 있다(IPCC, 1995). 따라서 CH₄와 같은 온실기체에 대한 평가는 그 질적인 기여도가 강조되는 경향이다. 이러한 점들을 감안할 때, 지구온난화문제의 해결책을 찾기 위해서는 CO₂와 같은 주성분은 물론 CH₄와 같은 성분의 제어와 관련된 부분도 간과하여서는 곤란하다. CH₄의 주요 발생원은 산불 및 들불, 가축류, 곡류생산 경작지 등이 있고, 산업시설로는 채탄장 등이 중요한 발생원으로 간주되고 있다. 이렇게 대기 중에 배출된 CH₄은 주로 OH radical에 의하여 산화 제거되며, 일부 토양과의 반응, 성층권으로 유입되면서 소멸되는 것으로 알려져 있다(송기범·김기현, 2000). 특히 CH₄의 장시간적 농도변화 경향을 보면 상당한 수준의 변화를 볼 수 있다. 산업혁명 이전의 CH₄ 농도가 800ppb 수준이었던데 반해, 현재 전지구적 규모의 평균농도가 약 1720ppb로서 115% 정도의 높은 증가율을 보이고 있다. 또한 대류권내의 CH₄ 농도 역시 매년 1%씩 증가하고 있다. 이러한 사실은 문제의 심각성이 보다 현실화되고 있다는 것을 증빙하는 직접적인 사례라고 할 수 있을 것이다(Byard W. Mosher, 1999).

지구온난화를 다루기 위한 국제간 협력이 불가피한 상황에서, 국내에서도 거점지역을 중심으로 온실기체의 농도관측을 상시 수행하는 일과 그러한 자료를 바탕으로 이들 성분의 시간적 경향성을 체계적으로 평가하는 일이 시급하게 요구되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 노력의 일환으로, 본 연구에서는 온실기체를 구성하는 주요성분 중 CH_4 를 택하여, 그 농도분포를 시간적인 기준을 중심으로 해석하고자 하였다. 이를 위해, 전남 무안 기상대에서 1995년 8월부터 1997년 11월까지 관측한 CH_4 자료를 이용하여, 한반도의 국지적 규모에서 진행되는 주요 온실기체 성분의 주기적인 경향성을 분석하였다. 그리고 여타 국외에서 운영중인 주요정점으로부터 확보된 동시간

대의 자료를 비교분석에 활용하였다. 이를 위해 동시에 관측된 기상변수들을 이용하여 다양한 통계분석을 실시하고, 국외 주요관측점의 자료들을 활용하여 수평적인 기준으로 CH_4 농도의 시간적 경향성에 대한 비교분석을 수행하였다. 본 연구진은 이미 본 연구지점에서 관측된 자료를 활용하여 이산화탄소에 대한 시간적 농도분포의 경향성을 설명한 바 있다(송기범·김기현, 2000).

연구 방법

본 연구에서 CH_4 의 성분측정은 전남 무안군 해제반도에 위치한 무안기상대(해발고도: 23.3m, 35.06'N,

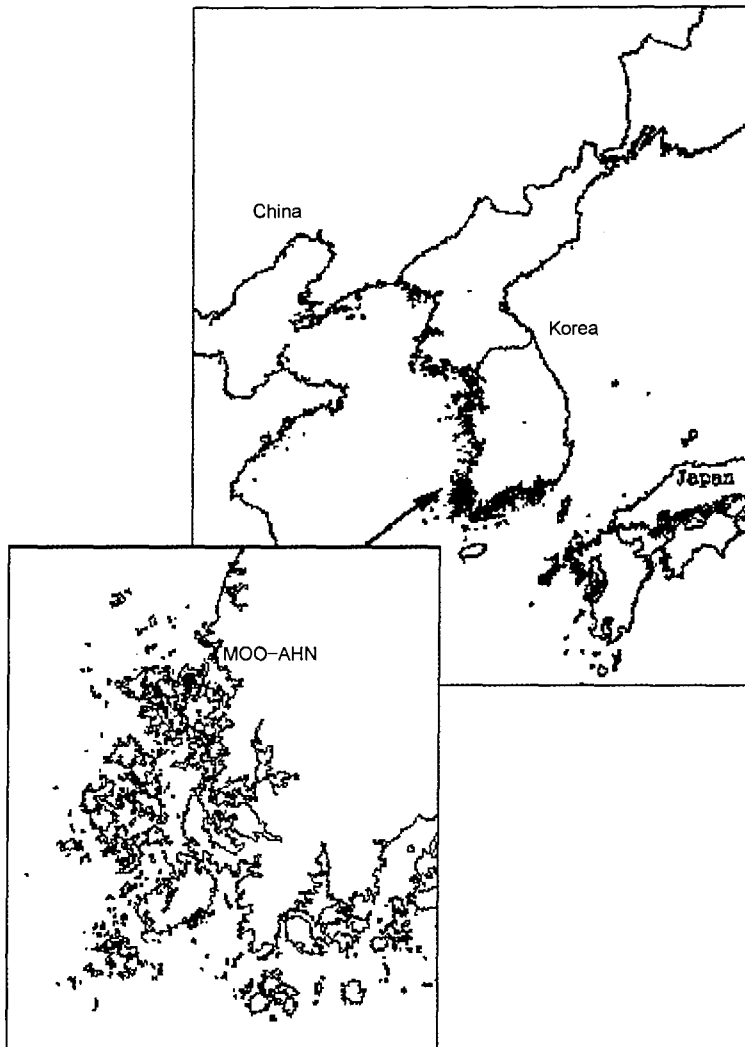


Fig. 1. Geographical map of Moo-Ahn (MAN) station (35° 06'N, 126° 17'E) in Korea.

126.17°E를 중심으로 이루어졌다(Fig. 1). 연구대상 지역은 북서쪽으로 203m의 낮은 봉대산이 위치하고 있을 뿐, 동쪽을 제외한 삼면이 바다로 둘러싸여 있다. 주변지역은 주로 농경지로 구성되어 있고, 해발고도 23.3m를 유지하는 저고도 지역이다. 기상청은 1992년에 온실기체 관측소를 이 지역에 설립하였으며, 이 관측소는 온실기체 연속 관측시스템을 이용하여 대기 성분의 변화추이를 실시간 중심으로(in-situ 상태로) 관측하였다. 1994년 1월부터 CO₂의 관측을 시작으로, 같은 해 2월에는 CFCs(CFC-11, CFC-12)를, 1995년 3월부터는 N₂O, CH₄에 대한 관측을 추가적으로 수행하였다. 그러나 1997년 말 업무의 효율화와 세계기상기구의 지구대기감시(WMO/GAW: World Meteorological Organization/Global Atmospheric Watch)계획에 따른 관련업무통합 차원에서 배경대기관측소를 태안반도에 위치한 안면도(해발고도: 47m, 36.31°N, 126.19°E)로 이전하였다. 따라서 1998년 4월을 기점으로 국내의 온실기체 성분의 장기적/규칙적 관측업무의 수행은 본 연구의 주대상인 무안지역 대신 안면도 관측소를 중심으로 이루어지고 있다.

무안지역에서 수행한 대기 중 CH₄ 성분의 농도분석은 Flame Ionization Detector(FID)를 장착한 가스 크로마토그래피(모델명 HP-5890 II)를 사용하여, 매 30분 단위로 이루어졌다. 이를 토대로 매시간 평균농도(또는 일평균농도 등)를 산출한 후, 시간적 변화의 경향성을 분석하는데 활용하였다. 또한 이들 자료 중

측정장비의 문제 또는 주변환경의 급격한 변화와 같은 외부적 요인에 의해 발생할 수 있는 실험오차의 폭을 줄이기 위해, 임의로 30분 단위로 관측된 CH₄의 농도로부터 20% 범위를 벗어나는 값들을 outlier로 간주하고 분석에서 제외하였다. 참고로 이러한 과정을 통해 제어된 자료는 전체 자료의 약 8.4%를 기록하였다. 기상측정요소는 무안기상대에서 측정된 풍향, 풍속의 매시간자료, 3시간 간격으로 관측된 기온 및 습도자료 등을 이용하여 계절별 또는 주야간대로 구분한 후 분석을 실시하였다.

결과 및 고찰

연구지역의 기상조건과 전체 자료의 경향성

본 연구에서 관측된 CH₄과 주변환경변수의 통계적 요약결과를 Table 1에 정리하여 제시하였다. 주 연구대상지역인 무안의 기온은 온대지역에서 흔히 발견되는 4계절적 변화의 양상을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 강수량의 경우, 여름에는 1.8±2.9mm(N=106)로 최대치를 나타내는 반면 겨울에는 0.4±0.9mm(N=108)으로 최소치를 보이는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 상대습도에도 그대로 반영이 되어 여름에 81.1±9.1%(N=276) %로 가장 높고, 기타 봄, 가을, 겨울에는 각각 67.6±13.5%(N=276), 66.3±12.5%(N=273), 66.2±16.1%(N=271)로 거의 비슷한 값을 유지하였다. 관측기간 동안 계절별 풍향경향을

Table 1. A statistical summary of CH₄ and relevant environmental parameters measured concurrently from Moo-Ahn (MAN) Station, Korea (Aug. 1995 ~ Nov. 1997).

Parameter (unit)	Spring	Summer	Fall	Winter	Total
	Mean±SD(N) Range	Mean±SD(N) Range	Mean±SD(N) Range	Mean±SD(N) Range	Mean±SD(N) Range
CH ₄ (ppb)	1883±75.4(180) 1629 ~ 2191	1921±92.9(198) 1606 ~ 2254	1909±85.8(261) 1640 ~ 2327	1869±74.2(173) 1618 ~ 2155	1898±85.3(812) 1606 ~ 2327
TEMP. (°C)	11.1±4.9(276) 0.9 ~ 21.3	24.1±2.9(276) 17.6 ~ 29.1	15.8±5.4(273) 1.9 ~ 27.8	2.3±2.8(271) -5.0 ~ 10.3	13.3±8.9(1096) -5.0 ~ 29.1
RAINFALL (mm)	1.1±1.8(92) 0 ~ 9.8	1.8±2.9(106) 0 ~ 17.3	1.1±2(76) 0 ~ 12.9	0.4±0.9(108) 0 ~ 4.6	1.1±2.1(382) 0 ~ 17.3
wind dir. (°)	240.9(276) 0.3 ~ 360	215.5(276) 0.7 ~ 358.6	178.7(273) 0.2 ~ 359.5	193.9(271) 0.2 ~ 360	207.4(1096) 0.2 ~ 360
WIND SP. (msec ⁻¹)	2.7±1.1(276) 1.0 ~ 5.8	2.5±1.1(276) 1.0 ~ 5.8	2.3±1.0(273) 0.6 ~ 5.8	2.6±1.3(271) 0.2 ~ 6.7	2.5±1.1(1096) 0.2 ~ 6.7
Rel. humidity (%)	67.6±13.5(276) 33.9 ~ 96.8	81.1±9.1(276) 57.0 ~ 98.6	66.3±12.5(273) 34.4 ~ 97.6	66.2±16.1(271) 33.0 ~ 97.9	70.3±14.5(1096) 33.0 ~ 98.6
Pressure (HPa)	1016.3±6(276) 1001.9 ~ 1029.9	1008.3±3.8(276) 995.3 ~ 1016.2	1008.3±5.4(273) 1003.8 ~ 1031.2	1024.6±4.8(271) 1005.7 ~ 1036.9	1016.8±7.7(1096) 995.3 ~ 1036.9

*All statistical terms are derived using daily mean values for each parameter.

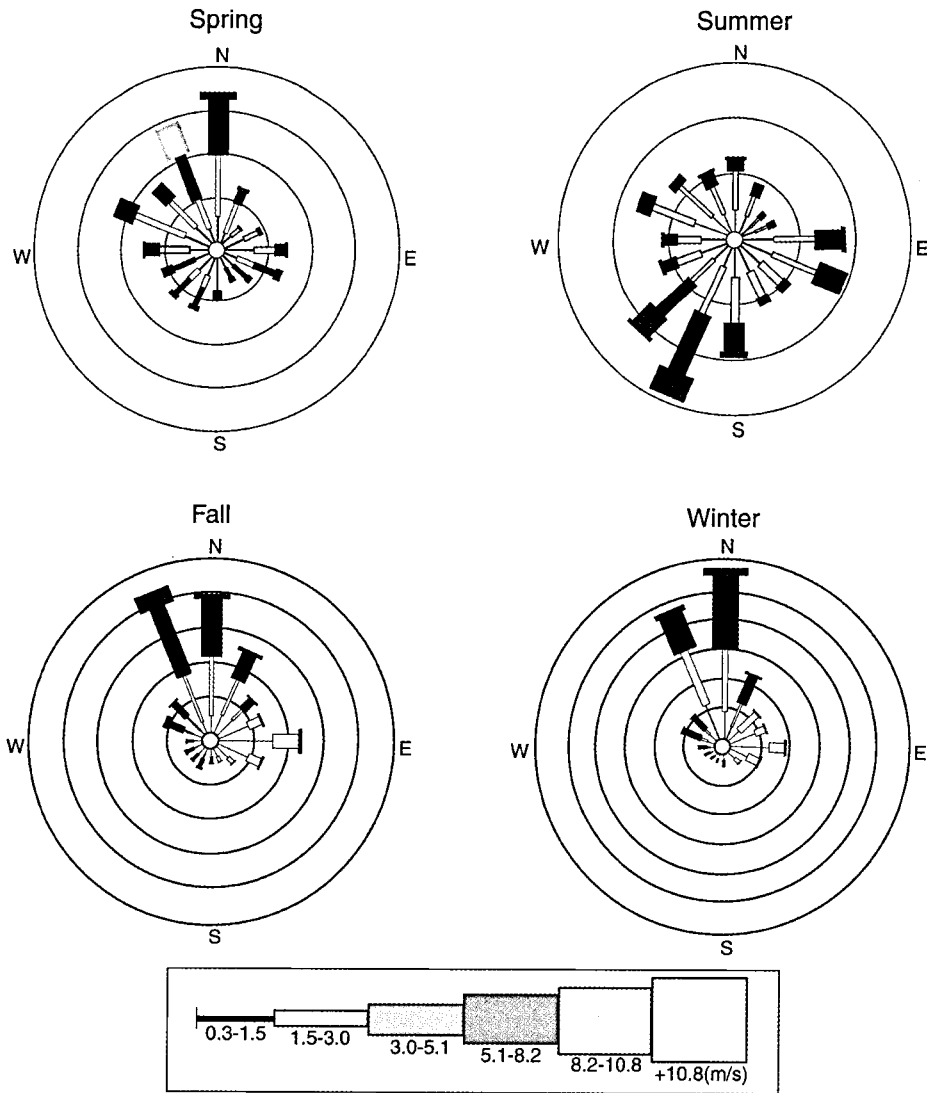


Fig. 2. A plot of frequency distribution of wind rose in the Moo-Ahn station (MAN). The patterns were compared among four different seasons.

비교한 Fig. 2의 결과에서도 계절별 풍향 변화가 뚜렷하다는 것을 알 수 있다. 봄철은 모든 방향에서 유사한 빈도로 바람이 관측되지만, 특히 북풍의 발생빈도가 높다. 여름철에 들어서면 동풍과 남서풍의 빈도와 세기가 월등히 높아지고 다른 방향에서는 바람의 발생빈도가 현저히 줄어드는 것을 볼 수 있다. 가을이 되면 다시 주풍이 북풍이 되며, 북서 ~ 북동 방향으로 세기와 빈도가 비슷하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 겨울철에는 강한 북풍 계열이 주류를 이루고 있는데, 이는 한반도 지역의 전형적인 겨울 기압 배

치하에서 나타나는 바람의 발생경향을 반영하는 것으로 보인다.

CH₄는 대기 중에서 비교적 긴 체류시간(3.6년)과 안정된 화학적 특성을 유지한다(기상연구소, 1996). 따라서 CH₄의 변화양상에 대한 분석은 단기적인 대기오염의 문제로 접근하기보다, CO₂와 마찬가지로 장기적인 시간적 틀과 광역적인 규모로 농도분포의 경향성을 해석하는 것이 중요하다. 이러한 연구목적에 접근하기 위하여 비교대상지역으로, WMO/GAW가 설정한 배경대기관측소들 중에서 한대와 열대기후

Table 2. The site characteristics of CH₄ measurements in the present study.

Site code	Site	Latitude	Longitude	Elevation (m)
MAN	Moo-Ahn (Korea)	35.06' N	126.17' E	23.3
BRW	Point Barrow, Alaska (U.S.A)	71.19' N	156.36' W	11
MLO	Mauna Loa, Hawaii (U.S.A)	19.32' N	155.35' W	3397

권역을 대표할 수 있는 Point Barrow(U.S.A), Mauna Loa(U.S.A)를 각각 택하였다. 본 연구의 대상지역인 무안과 비교대상지역인 세계의 주요 배경관측지점들에 대한 일반적인 사항들은 Table 2에 요약하였다. 본문 아래에는 주요 대상지역의 명칭들을 다음과 같이 각각의 약칭을 이용하여 표기하고자 한다: (1) MAN(Moo-Ahn: 무안), (2) BRW(Point Barrow), (3) MLO(Mauna Loa). 비교대상지역간의 농도분포를 동일한 기준에서 비교하기 위해, 비교대상지역 또한 MAN 지역과 동일한 기간대에 측정된 CH₄ 농도 자료를 이용하여, 기간대별 평균을 산출하고 비교분석에 활용하였다.

전체관측기간동안 관측된 일주기 농도자료를 이용하여 MAN 지역의 평균농도를 구하면, 1898±85.3ppb (N=812)로 나타난다. 이와 같은 수준의 농도는 비교대상으로 선정한 BRW(1832±29.6ppb, N=823) 또는 MLO(1745±14.8ppb, N=818) 지역의 농도에 비해 각각 3.5, 8.1%씩 높은 수준이다. 본 연구지점과 비교관측지점에 대한 CH₄의 농도분포특성을 비교하기 위한 가장 기본적인 방편의 하나로 각 측정점의 농도자료를 이용하여 빈도분포를 비교해 보았다. Fig. 3에 제시된 빈도분석의 결과에 의하면, 지점별로 최빈농도값에 현저한 차이를 띠고 있다는 것을 확인할 수 있다. 열대지역을 대표하는 MLO에서 1750ppb

정도에서 최빈값이 나타났다. MLO 지역이 비교대상 지역 중 가장 낮은 농도를 보이는 현상도 CH₄ 산화의 주역할을 하는 OH radical의 농도가 열대지역인 적도에서 비교적 높게 나타나는 점이 어느 정도 반영된 것으로 보인다(정용승 · 이근준, 1992). 그리고 한대지역인 BRW에서는 세 개의 비교대상 중 2번째에 해당하는 1850ppb의 최빈값이 확인되었고, 본 연구의 주 대상인 MAN 지점은 가장 큰 최빈값이 1900ppb로 나타났다. 일반적으로 북반구에서의 CH₄ 농도는 저위도에서 고위도로 위도값이 커짐에 따라 비례하여 높아지는 경향을 나타낸다(NOAA/CMDL, 2000). 중위도 지역에 해당하는 MAN 지역이 고위도의 BRW 지역보다 고농도를 나타내는 현상은 다음과 같이 요약할 수 있다. 한반도 지역에 여러 가지 배출원이 밀집해 있다는 점을 감안하면, 본연구의 주대상인 MAN 지역이 여타 지역에 비해 인위적인 오염원에 더 민감하게 영향을 더 받을 수 있을 것이다. 따라서 MAN 지역의 최고농도는 이러한 사실을 반영한 결과로 설명할 수 있을 것이다.

일주기 농도변화

측정기간동안 관측된 전체자료를 이용하여 각 시간대별 평균농도를 산출한 후, 국내외의 지점에 대한 CH₄ 농도의 일주기 변화양상을 동일한 기준으로 비

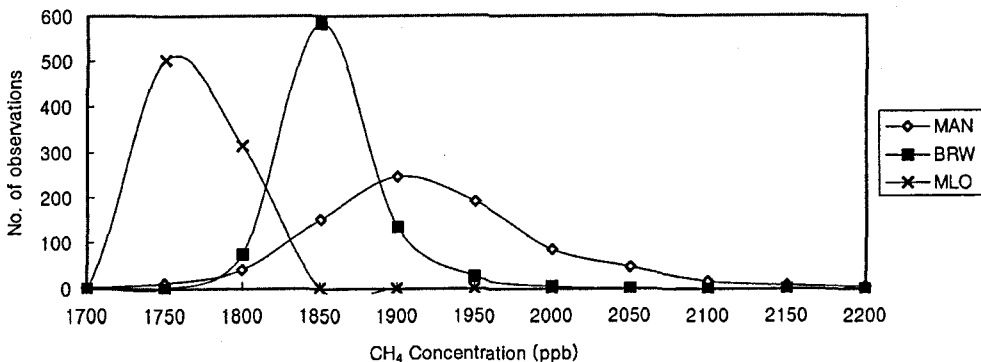


Fig. 3. A plot of frequency distribution of CH₄ concentration in the Moo-Ahn station and comparable sites. Symbols for the stations denote: MAN (Moo-Ahn, Korea), BRW (Point Barrow, Alaska), and MLO (Mauna Loa, Hawaii).

Table 3. Estimates of CH₄ emissions from various anthropogenic and nature sources in 1988 (Cicerone and Orem-land, 1988) Emission (Tg/yr)

anthropogenic	80
ruminants	110
rice paddy fields	55
biomass burning	40
landfills	35
coal mining	45
nature	
swamps and marches	115
lakes	5
oceans	10
other nature	40
total anthropogenic	365
total nature	170
SUM	535
F	0.68

Notes: F is the ratio of anthropogenic emission to total emissions.

교해 보았다(Fig. 4). 본 연구의 주관측대상인 MAN 지역의 경우, 기온이 상승하기 시작하는 6:00 AM

전후를 기준으로 농도치가 낮게 유지되는 것으로 나타났다. 낮시간대에 상대적으로 낮은 농도가 나타나는 현상은 기온상승과 일사량 증대에 따른 광화학반응의 촉진과 그로 인한 대기 중 OH radical의 증가로 CH₄의 소멸, 그리고 낮에는 상대적으로 CH₄ 농도가 낮은 해풍이 주를 이루어 농도가 희석되는 효과 등이 각각 또는 종합적으로 영향을 미치는 것으로 사료된다. 반면에 야간대에 상대적으로 농도가 상승하는 현상은 인위적인 오염원이 존재하는 내륙지역을 거쳐온 육풍이 야간대에 주를 이룬다는 점과 혼합층고도의 변화(역전층의 형성 등의) 등의 요인에 의해 고농도의 경향이 유지되는 것으로 보인다. 그러나 열대기후를 대표하는 MLO 지역과 한대기후를 대표하는 BRW 지역에서는 이러한 경향성을 확인하기가 쉽지 않다. 지역간에 발견되는 이러한 농도분포 경향의 차이는 기후권별 CH₄의 농도분포 경향성과 상대적으로 청정한 조건의 유지가 어려운 국내지점의 상황이 동시에 복잡하게 반영된 결과로도 볼 수 있을 듯하다. 다만 4계절 중 기온이 가장 높은 여름철에

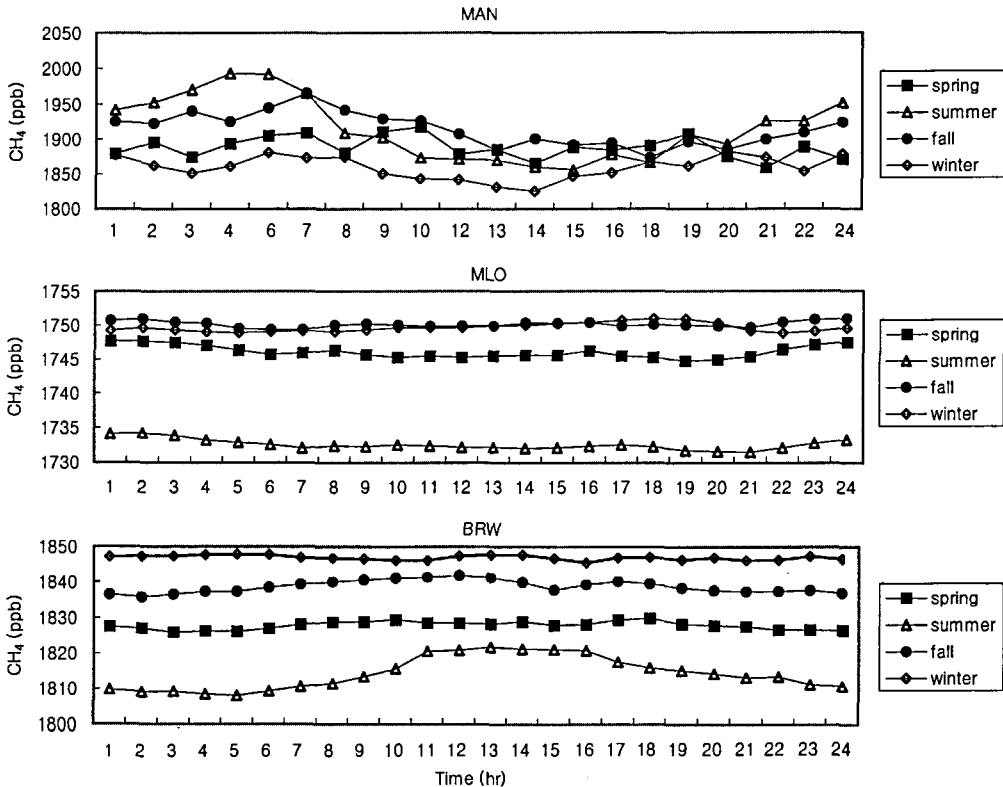


Fig. 4. Comparison of diurnal variability of CH₄ among different sites across seasons. Hourly mean concentrations for each season were derived after dividing the whole data sets into spring (3~5), summer (6~8), fall (9~11), and winter (12~8).

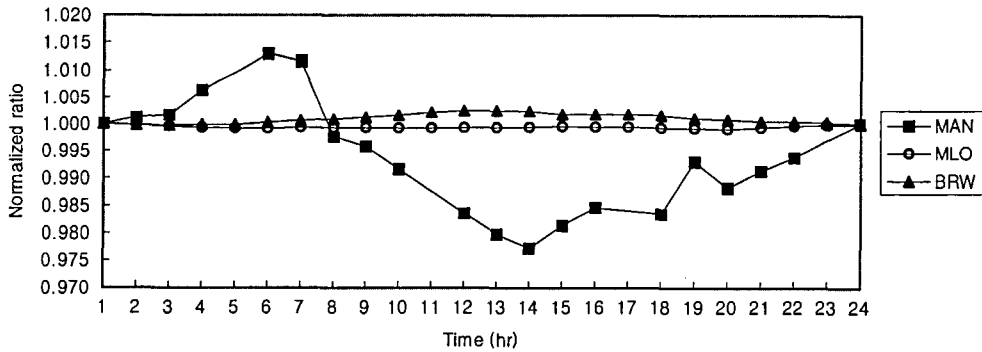


Fig. 5. Diurnal variation patterns among different study sites are compared after normalization. The mean hourly data for each site were derived by normalizing the hourly data to that measured at 1 AM for each site. The reference concentration for 1 AM data used for each site are as follows: Moo-Ahn, Korea (MAN: 1906 ppb), Point Barrow, Alaska (BRW: 1830 ppb), and Mauna Loa, Hawaii (MLO: 1746 ppb).

국외지점에서 역시 낮은 농도를 보이는 것으로 보아, 대류권 CH₄의 주요 소멸과정이 OH radical에 의한 것임을 감안한다면 기온과 CH₄ 농도간에는 어느 정도 음의 상관성이 존재할 가능성도 추정케 한다.

각 지점에서 관측된 자료를 이용하여 24시간 또는 일주기 변화의 경향성을 계절적으로 구분하기 위하여 모든 자료를 기준시점으로 설정한 1시의 평균 농도치를 이용하여 표준화한 결과를 Figs. 5, 6에 제시하였다. 이를 통하여 모든 지점에서 나타나는 CH₄의 일주기 경향을 보다 세부적으로 파악할 수가 있다. 이러한 비교방식에 의하면 국내의 MAN 지역에서는 기타 지점에 비해 농도변화의 진동폭이 크다는 것을 확인할 수가 있다. 이와 같은 현상은 국외의 비교대상지점들에 비해, 국내지점의 경우 계절적으로 일어나는 온도변화의 폭이 크고, 중국과 같은 거대한 오염원의 영향에 민감한 서해안의 지리적인 요인, 국부적으로 CH₄의 발생원과 소멸원이 동시에 작용한다는 사실을 일부 또는 종합적으로 반영한데 따른 결과로 보인다.

일주기 변화경향을 조절하는 요인들

한반도는 삼면이 바다로 둘러싸여 있고 또한 중국과 같이 대규모 배출원에 인접해 있다는 지형적인 특수성으로 인해 주변 해양은 물론 한반도와 중국을 포함하는 내륙지역에까지 다양한 종류의 발생원과 소멸원이 존재할 것으로 기대된다.

CH₄에 대한 농도변화의 진동폭을 살펴보면(Fig. 5), MAN 지역의 농도경향은 비교대상관측지점인 MLO, BRW 지역에 비해 그 진동폭이 상당히 크게 나타나

는 것으로 확인된다. 이와 같은 현상의 원인으로는 MAN 지역이 농경지와 같이 주요 발생원 지역에 인접하여 있다는 점과 동시에 자동차와 같은 인위적 오염원의 활동이 활발한 지점에 인접한 데 따른 영향 등이 반영된 것으로 보인다. 즉 일주기의 기온차가 미미한 국외의 비교대상지점들에 비해 국내의 경우는 시간적 주기에 민감한 발생원들의 영향으로 인해 CH₄ 농도의 변화에 큰 진동폭이 나타나는 것으로 사료되어진다. 또한 모든 관측지점에서 여름철의 진폭이 겨울철보다 훨씬 높게 나타나는 것을 볼 수가 있는데, 온도변화로 파생되는 여러 가지 현상들이 민감하게 연계된 데 따른 결과로 사료되어진다. 이와 같은 현상들은 MAN 지역에서 농도변화의 강도를 상대적인 관점에서 비교한 Fig. 6에서도 뚜렷하게 확인된다. 또 다른 관점에서 보면 동아시아 지역 몬순의 영향도 어느 정도 반영된 것이 아닌가 짐작하게 한다. 즉, 우리나라의 MAN 지역이 인간의 영향이 집약되어 있는 대륙의 동안에 위치하고 있어, 동계에는 중국 대륙으로부터 불어오는 북서풍의 영향에 상대적으로 강하게 노출되어 있고, 하계에는 북태평양으로부터 불어오는 남동풍의 영향을 직접적으로 받게 된다. 따라서 이러한 다양한 원인들이 CH₄의 계절에 따른 농도 차이를 심화하는데 일조하는 것으로 보인다.

각 지역별로 나타나는 CH₄ 농도의 일주기적 변화 양상이 지역적 요인에 어떠한 방식으로 영향을 미칠 수 있는 가를 파악하기 위하여 통계적 분석을 실시하였다. 각 지역의 계절별로 구분된 자료군으로부터 구한 시간대별 농도자료를 이용하여, 각 지역의 시간

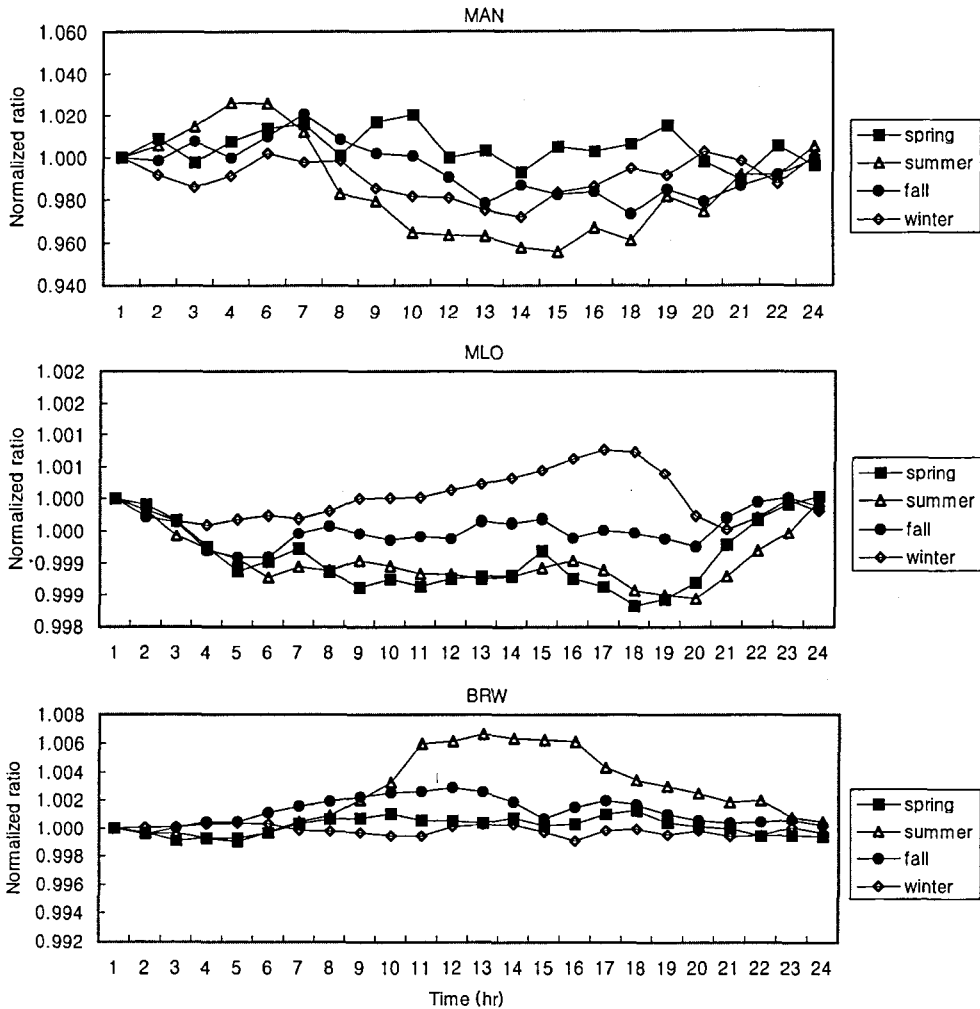


Fig. 6. Comparison of normalized diurnal variation patterns of CH₄ between different seasons for each site. Hourly data for each season were normalized to the mean concentrations observed at 1 AM such as (1) MAN: 1879 (spring), 1942 (summer), 1925 (fall), and 1878 ppb (winter), (2) MLO: 1748 (spring), 1734 (summer), 1751 (fall), and 1750 ppb (winter), (3)BRW: 1828 (spring), 1810 (summer), 1836 (fall), and 1847 ppb (winter).

대별 농도자료간에 존재하는 상관성의 강도를 분석하였다(Table 4). 상관분석 결과를 살펴보면, MAN 지역에서는 여름-가을간의 상관계수가 0.91로 가장 높게 나타났다. 전체적으로 보면, 계절별로 구분된 일주기 경향의 상관성이 대체로 강한 양의 상관성을 보였다. 이는 계절적으로 CH₄의 절대적인 농도값에서 차이를 보이지만, CH₄의 일주기적인 변화양상은 계절에 따라 유사하게 나타날 수도 있다는 것을 추정가능하게 한다. 이와 같이 높은 양의 상관성이 나타나는 경향은 MLO 지역에서 더욱 뚜렷하다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 MLO 지역의 배출원이

일주기적으로 보여주는 경향성이 계절을 거치며 별다른 변화를 겪지 않고 유지되기 때문인 것으로 보인다. 특히 4계절 모두 기온과 같은 기상인자들의 변화가 일정하고, CH₄의 오염원이 멀리 떨어져 있어 인위적인 오염원에 대한 영향이 배제된 환경이 유지되고 있음을 짐작할 수 있다. 따라서 CH₄의 생성/소멸이 식생과 같은 자연적 요인에 의해 주도적으로 조절되는 결과로 분석되어진다. 이와 같이 시간대별 자료의 비교에서 강한 양의 상관성이 나타나는 현상은 한대기후인 BRW 지역에서도 어느 정도 유사하게 유지가 되는 것으로 보인다. 그러나 겨울철의 경우, 타

Table 4. Results of correlation analysis between different seasons. Hourly concentration data derived for each season were used to make correlation analysis of each study site.

MAN				
	Spring	Summer	Fall	Winter
Spring	1			
Summer	0.73	1		
Fall	0.55	0.91	1	
Winter	0.42	0.69	0.76	1

MLO				
	Spring	Summer	Fall	Winter
Spring	1			
Summer	0.97	1		
Fall	0.74	0.83	1	
Winter	0.89	0.93	0.89	1

BRW				
	Spring	Summer	Fall	Winter
Spring	1			
Summer	0.69	1		
Fall	0.71	0.83	1	
Winter	-0.27	-0.51	-0.55	1

계절의 자료에 대비해서 역상관 관계를 형성하고 있음을 확인할 수가 있다. 이러한 현상은 겨울철의 배출원 특성이 어느 정도 타 계절과 차이를 나타내기 때문에 나타나는 현상으로 사료되는데, 따라서 BRW와 같은 지역에서도 어느 정도 인위적 발생원의 영향이 작용하고 있으리라 가능성을 짐작케 한다.

풍향인자와 메탄농도의 변화

한반도는 삼면이 바다로 둘러싸여 있고 또한 중국과 같이 대규모 배출원에 인접해 있다는 지형적인 특수성으로 인해 주변 해양은 물론 한반도와 중국을 포함하는 내륙지역에까지 다양한 종류의 발생원(또는 소멸원)이 존재할 것으로 기대된다. 연구대상지역인 MAN 지역은 서해안에 위치하고 있어, 여러 가지 발생원의 영향을 간접적으로 파악할 수 있는 풍향자료와 CH₄ 농도 간에 존재하는 경향성을 연계하여 분석하는 것도 중요한 의미를 지닌다고 할 수 있을 것이다.

Fig. 7은 MAN 지역에서 관측된 풍향과 농도자료를 이용하여, 주 풍향별 CH₄의 농도변화양상을 그림으로 도시하였다. 이 결과에 의하면 전체 관측기간동안 동, 서, 남, 북풍계열이 나타날 경우 MAN 지역에서의 CH₄ 평균농도는 각각 1915±128(N=3614), 1887±130(N=2927), 1882±130(N=2411), 1891±129ppb(N=7995)로 나타났다. 이러한 분석에 의하면, 동풍계열일

때 CH₄ 농도가 가장 높고, 북풍, 서풍, 남풍계열의 순서로 농도가 감소하는 경향성을 확인할 수 있다. 이와 같이 동풍계열과 기타 풍계의 농도차이가 최고 30ppb 정도로 뚜렷하게 나타나는데, 이는 관측점을 중심으로 동쪽지역에 인위적인 오염원이 존재할 가능성을 추정케 한다. 이처럼 풍계별로 농도차이가 크게 나타나는 현상은 MLO 관측소에서 발견한 CH₄의 농도변화가 오염물질의 장거리 이동현상과 연계하여 해석한 연구에서도 제시된 바 있다(Harris *et al.*, 1992). 즉 이러한 현상은 관측지점인 MAN 지역이 국부적인 발생원의 영향에도 어느 정도 민감하게 영향을 받을 가능성을 간접적으로 시사하는 증거라고 볼 수도 있겠다.

Fig. 7b에는 하루를 4개의 시간대로 묶은 후 시간대별 바람의 발생빈도를 비교하였다. 그 결과에 의하면, 1~6, 7~12시간대에 인위적인 오염원의 존재 가능성이 높은 방향, 즉 동·북풍이 우세하다. 반면 13~18, 19~24시간대에는 동풍계열의 빈도가 감소하고 상대적으로 서풍계열의 빈도가 올라가는 것을 알 수 있다. 시간에 따른 풍향별 농도변화를 비교한 결과에 의하면(Fig. 7c), 북풍계열의 빈도가 전체 24시간동안 가장 우세하기 때문에, MAN 지역에서의 평균농도(1898ppb)가 일정 수준 이상 높게 나타나는 원인으로 작용한 듯 하다. 이와 같이 MAN 지역에서의 풍향별 CH₄ 농도에 대한 경향성의 비교 결과에 의하면, 두 가지 사실을 확인할 수 있다. 연구기간동안 관측된 자료를 이용하여 바람의 일주기 경향성을 발생빈도를 중심으로 비교할 경우, 북풍의 발생빈도가 가장 크다. 그러나 단순히 농도의 크기만으로 볼 경우, 동풍계열에서 고농도의 발현가능성이 가장 뚜렷하다. 이와 같은 현상은 내륙쪽에 위치한 발생원의 영향을 민감하게 반영한 결과로 사료된다.

결론

전남 서해안에 위치한 무안기상대를 중심으로 관측한 CH₄의 농도자료와 기상자료를 이용하여, 한반도 내에서의 국지적으로 진행되는 CH₄의 일주기적 변화 추세를 분석하였다. 이를 통하여, CH₄의 단기적인 변화 추세를 파악하고 그 의미를 살펴보았다. 빈도분포의 분석결과 등에 의하면, MAN 지역의 CH₄ 농도는 국외의 비교관측지점인 BRW, MLO 지역보다 훨씬 높은 농도대에 존재한다는 사실이 뚜렷하게 나타났다.

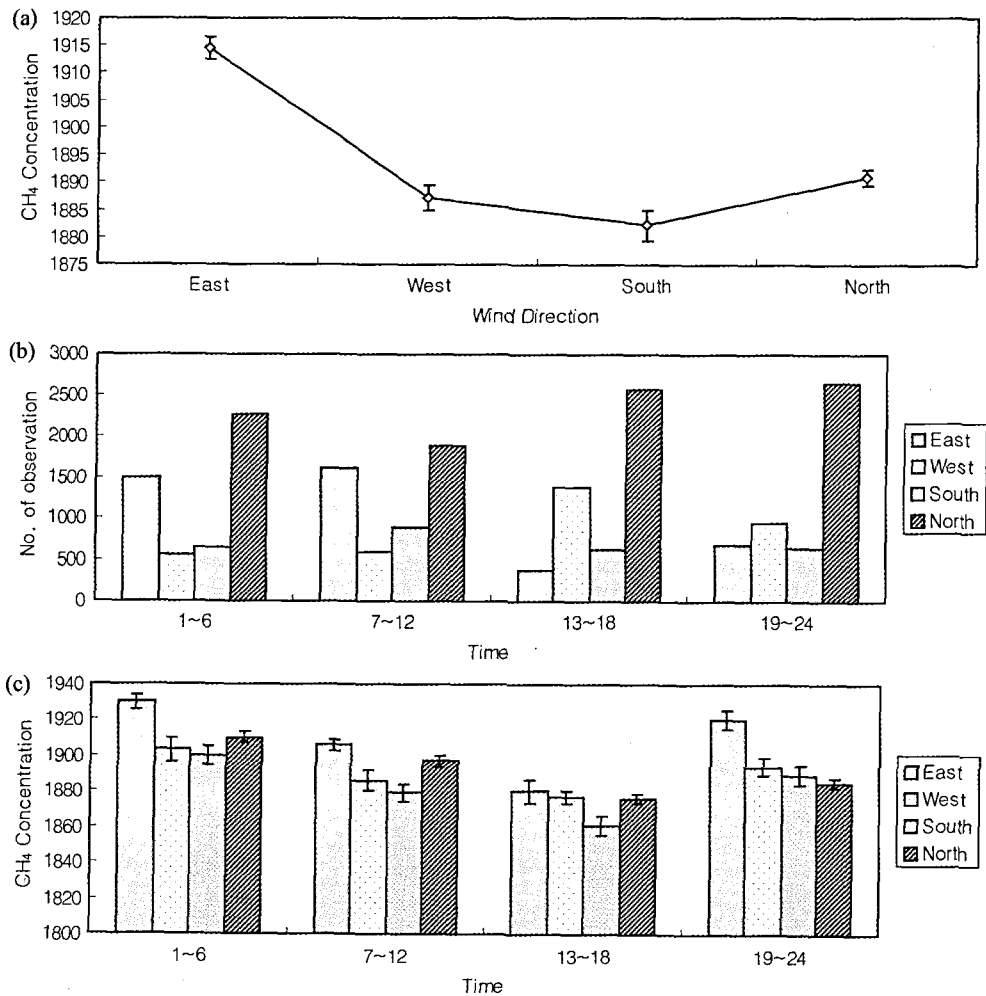


Fig. 7. The influence of observed wind direction at MAN during the whole study period (Aug. 1995 to Nov. 1997): (a) The mean CH₄ concentration for each of four direction; (b) The frequency plot of wind rise as a function of time; and (c) The mean concentration of CH₄ is compared as a function of both time and wind direction.

이는 국내 관측점의 경우 보다 다양한 배출원의 영향에 종속됨은 물론이거니와 풍향과 같은 기상학적 요인의 영향을 동시에 복합적으로 종속된 데 따른 결과로 사료된다.

MAN 지역의 시간대별 CH₄ 농도는 자정 이후 이른 오전시간대부터 농도의 상승이 이루어지고 4~6시 사이에 정점을 이루는 것으로 나타났다. 기온이 상승하는 낮 시간대에는 농도가 어느 정도 감소하는 경향을 보이고, 기온이 가장 높은 시간대에 가장 낮은 농도대에 근접하는 것으로 나타났다. MAN 지역의 지리적인 특수성을 감안하여 풍향별 CH₄ 농도의 변화양상을 24시간 주기로 살펴본 결과, 북풍이 가장

빈번하게 일어난다는 점을 알 수 있었다. 그 외 동풍이나 서풍의 발생은 시간대별로 가변적인 경향성을 보여 주었다. 특히 이와 같은 풍향기준의 농도분포에 대한 비교결과는 풍계에 따른 농도 차이가 크게 벌어질 수 있다는 점을 확인시켜 주었다. 특히 인위적 오염원의 역할이 상대적으로 강할 것으로 기대되는 (내륙지역을 거쳐오는) 동풍계열의 바람이 주를 이룰 때, CH₄의 농도가 가장 큰 값을 보였다. 반면 기타 풍계가 나타날 경우에는 상대적으로 저농도를 나타냈다.

CH₄는 대기 중에서 비교적 안정하기 때문에 단기적인 대기오염보다는 CO₂와 마찬가지로 장기적인 시간적 틀에서 지구 환경변화에 영향을 줄 수 있다.

CO₂ 보다 대기에서의 체류시간이 짧아 지구온난화에 미치는 영향이 상대적으로 작지만, 부차적으로 이들의 일부는 궁극적으로 대기 중에서 산화되어 CO₂로 변환된다는 점도 CH₄의 중요성을 강조할 수 있는 요인으로 지목된다(김기현 외, 2000). 국내에서 관측된 CH₄의 농도가 매우 높은 수준임을 감안할 때, 국가 차원에서 장기적이고 체계적으로 저감대책을 수립하는 것이 절실할 것으로 생각된다. 특히 이들 온실기체들의 증가는 국내에서 빈번하게 발생되고 있는 기상이변과 연계하여 해석되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구에 필요한 세계 주요 관측점의 모든 관련 자료들을 인터넷 상에 공개해 주신 NOAA, CMDL의 Carbon Cycle Group 관계자들에게 충심으로 감사드리는 바이다. 본 연구자료의 축적에 일익을 담당하신 모든 관계자 분들에게도 깊은 감사를 드리는 바이다. 본 연구는 한국과학재단이 지원하는 SRC 기후환경시스템연구센터의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

기상청 기상연구소, 1994, 온실기체 감시 시스템 개발 연구 (II) - 제 2차년도 최종보고서.
 기상청, 1997, 온실기체 관측연보, 제 1권 1995~1996년 관측자료.
 기상청, 1998, 온실기체 관측연보, 제 2권 1997년 관측자료.
 기상청, 1999, 온실기체 관측연보, 제 1권 1998년 관측자료.
 김기현·윤용훈·송기범, 2000, 국내외 관측점간의 비교분석을 통한 이산화탄소의 장주기적 농도변화 특성에 관한 연구. 한국지구과학회지, 17(1), 105-115.
 송기범·윤용훈·김기현, 2000, 이산화탄소의 단주기적 농도변화 특성에 관한 연구. 한국지구과학회지, 21(5), 434-448.
 전의찬·유은기, 1997, 전남 무안에서의 온실기체 변동 특성 분석, 207-209.
 정용승·이근준, 1992, 한국의 태안반도에서 관측된 CH₄의 지역적 배경농도에 관한 연구 - 1990~1992년 자료를 중심으로. 한국환경과학회지, 1(2), 33-48.

환경부, 1998, G-7 프로젝트(지구 규모 대기환경기초 및 기반 기술) 개발 사업의 세부 과제 - 지구 대기 조성 변화 감시의 제 2단계 제 2, 3차년도 연차 보고서: 연구기관- 기상청. 기상연구소, 152-155.
 Blaha, D., Bartlet, K., Czepiel, P., Harris, R., and Chrill, P., 1999, Natural and Anthropogenic Methane Sources in New England, 33(2), .
 Bogner, J. and Spokas, K., 1995, Landfill Methane Balance: Model and Practical Application, Proceedings Saradinia 95, Fifth International Landfill Symposium- Concepts, Process, Technologies and Operation, 1.
 Byard, W. Mosher., Peter, M. Czepiel, and Robert, C. Harris, 1999, Methane Emissions at Nine Landfill Sites in the Northeastern United States, Environ. Sci. Technol., 99, 2088-2094.
 De Visscher, A., Thomas, D., Boeckz, P., and Van Cleemputo, 1999, Methane Oxidation in Simulated Landfill Cover Environments, Environmental Science and Technology, 33(11), 1854-1859.
 Dlugokencky, E.J., Masarie, K.A., Lang, P.M., and Tans, P.P., 1998, Continuing Decline in the Growth Rate of the Atmospheric Methane Burden, Nature, 393(6684).
 Harris, J.M., Tans, P.P., Dlugokencky, E.J., Masarie, K.A., Lang, P.M., Whittlestone, S., and Steele, L.P., 1992, Variation in Atmospheric Methane at Mauna Loa Observatory related to Long-range Transport, J. Geophys. Res., 97, 6003-6010.
 Lamb, B.K., McManus, J.B., Shorter, J.H., Kolb, C.E., Mosher, B., Harris, R.C., Allwine, E., Blaha, D., Howard, T., Guenther, A., Lott, R.A., Siverson, R., Westberg, H., and Zimmerman, P., 1995, Development of Atmospheric Tracer Methods to Measure Methane Emissions from Natural Gas Facilities and Urban Areas, Environmental Science and Technology, 29(6), .
 Mosher, B.W., Czepiel, P.M., Harris, R.C., Shorter, J.H., Kolb, C.E., McManus, J.B., Allwine, E., and Lamb, B.K., 1999, Methane Emissions At Nine Landfill Sites in the Northeastern United States, Environmental Science and Technology, 33(12), 2088-2094.
 Riches, M.R., Jianping, Z., Wang, W.C., and Shiyan, T., 1992, The U.S. Department of Energy and the people's Republic of China's Academy of Science Joint of Research on the Greenhouse Effect: 1895-1991 Research Program, Bulletin American Meteorological Society, 73, 585-594.

2001년 6월 1일 원고 접수
 2001년 8월 3일 수정원고 접수
 2001년 8월 4일 원고 채택