5. CH_4 제거 기술(1)

정 순 관

지구온난화에 영향을 미치는 6대 온실가스 중 이산화탄소를 제외하면 메탄이 차지하는 비율이 가장 높은 것으로 나타나고 있다. 2010년 기준으로 전 세계 온실가스 배출량 중 메탄은 7,549 $MtCO_{2eq.}$로 20.7%를 차지하며 Non-CO_2 온실가스 중에서는 약 2/3 수준인 66%를 차지한다. 에너지 사용 분야에서 대부분이 배출되는 이산화탄소와는 달리 농업, 폐기물 분야에서 대부분의 메탄이 발생되는 것으로 알려져 있다.

<표 5-1> 2010년 Non-CO_2 온실가스 배출 영역 및 양

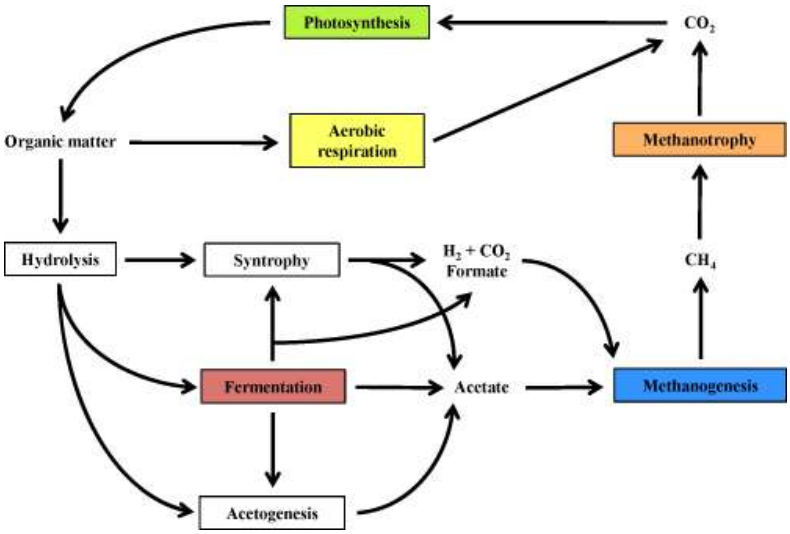
[$MtCO_{2eq.}$]

Sectors	CH_4	N_2O	F-Gases	Global Total Non-CO_2 Emissions	Percentage of Global Total Non-CO_2 GHGs
Agriculture	3,102	2,897	-	5,999	53%
Energy	2,991	54	-	3,044	27%
Industry	83	118	672	873	8%
Waste	1,374	97	-	1,471	13%
Global Total	7,549	3,166	672	11,387	
Percentage of Global Total Non-CO_2 GHGs	66%	28%	6%		

(Ref.; USEPA. 2012. Global Anthropogenic Non-CO_2 Greenhouse Gas Emissions: 1990 –2030)

자연계에서 메탄은 미생물의 혐기성소화(anaerobic respiration) 작용에 의해 생성된다. 미생물의 메탄 생성은 유기물의 혐기성 생물분해 (anaerobic degradation)와 발효(fermentation)과 같은 협기상태(anoxic environment)에서 메탄생성미생물(methanogen)에 의해서 이루어진다. 전체 메탄 순화 사이클을 고려하면 메탄생성미생물에 의한 메탄생성은 가장 마지막 단계에서 이루어지며 다양한 미생물에 의한 유기물의 가수분해, 발효, syntropy, 아세트화반응이 선행된다. 미생물에 의한 메탄의 소모는 메탄영향세균(methanotrphs)인 프로테오박테리아(Proteobacteria)에 의해 일어난다. 메탄영향세균의 대부분은 호기성 미생물이다. 따라서 메탄 산화는 퇴적물

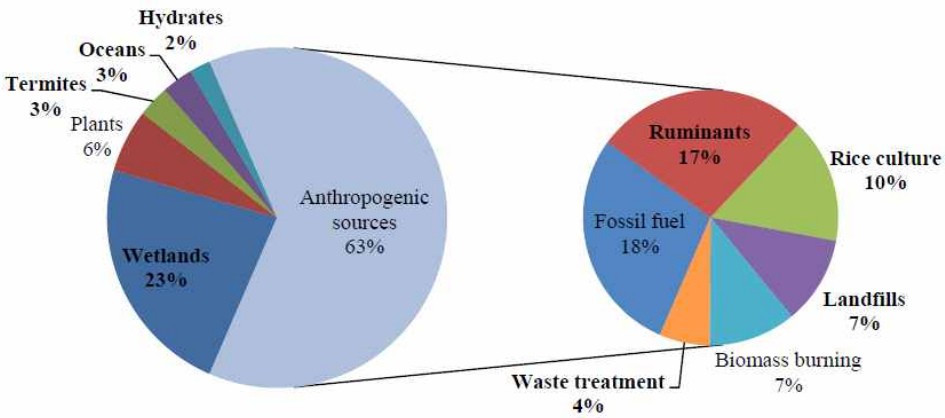
과 같은 혐기/호기성 경계에서 주로 일어나만다. 특히 토양에서는 메탄영향세균이 혐기성 영역에서 생성된 메탄을 대기 중으로 배출하는데 중요한 역할을 수행한다.



[그림 5-1] 자연계의 메탄 순환 사이클.

(Ref.; Loic Nazaries et. al., "Methanes, microbes and models: fundamental understanding of the soil methane cycle for future predictions", Environmental Microbiology, 15(9), 2395-2417(2013).)

메탄의 자연적 배출은 습지, 해양, 퇴적물, 식물과 하이드레이트(hydrates)와 같은 지질학적 물질에서 야기된다. 이중 습지에서 배출되는 양이 대부분을 차지한다. 산업혁명이전에서는 자연계에서 배출되는 메탄이 약 90%로 대부분을 차지하였으나 현재는 약 2/3가 인간의 경제활동에 의한 것으로 알려져 있다.



[그림 5-2] 대기중 메탄가스 주요 배출원

(Ref.: Conrad, R. "The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved", Environmental Microbiology Rep 1: 285–292. (2009)).

인류의 경제활동에 의해 배출되는 메탄은 에너지원(석탄, 원유, 가스) 채굴, 폐기물, 농업, 화학공정 등에서 발생한다. 농업분야에서는 메탄 발생 뿐 아니라 질소비료 사용에 의한 N_2O, 토양 유기 탄소에 의한 CO_2 배출이 동시에 일어난다. 벼 재재 이외의 경작지에서는 메탄의 발생이 아닌 메탄을 저장하는 저장소 역할을 하며 2010년 기준 약 38 $MtCO_{2eq}$.의 메탄을 저장하여 온실가스를 감소시키는 순 기능을 수행하였다. 벼 재배에는 물이 반드시 필요하며 물속에 존재하는 유기물이 미생물에 의해 서서히 분해되는 과정에서 물과 토양의 산소를 고갈시키며 이는 토양의 혐기성 조건을 유발한다. 이후 메탄생성미생물에 의해 메탄이 생성된다. 생성된 메탄 중 일부는 물로 다시 용해되나 나머지는 외부로 배출된다. 2010년 벼 재배에 의한 온실가스 배출(CH_4, N_2O, CO_2)은 약 561 $MtCO_{2eq}$.이며 쌀 생산이 많은 인도, 인도네시아, 방글라데시, 베트남, 중국이 전 세계 배출의 약 77%를 차지하였다. 벼 재배에 의한 온실가스 배출은 인구 증가, 소득 증가에 따라 2030년 750 $MtCO_{2eq}$.으로 2010년 대비 약 33% 증가할 것으로 예측되고 있다. 가축에 의한 메탄 발생은 전 세계 메탄 발생의 약 29%를 차지하고 있으며 장내 발효(enteric fermentation)에 의해 1945 $MtCO_{2eq}$.이 배출되어 가축에 의한 메탄 발생량의 90% 이상을 차지한다. 가축의 장내 발효에 의한 메탄 배출은 소, 양, 염소와 같은 반추동물(ruminant animals)에서 주로 발생된다. 반추동물이 식물을 섭취하면 되새김질을 통해서 셀룰로오스를 잘게 분해하고 미생물이 셀룰로오스를 짧은 길이의 지방산과 이산화탄소, 수소를 만든다. 지방산은 소가 흡수하고 이산화탄소와 수소는 고세균이 메탄가스로 환원시키는 과정을 통해 메탄이 발생하는 것으로 아려져 있다.

석탄은 에너지 생산 및 산업 공정의 원료로 사용되는 지구상에서 가장 풍부한 화석연료로 세계 경제에 가장 중요한 영향을 미치는 원료 중 하나이다. 노천광(surface mining)이나 지하에서 석탄을 채굴할 때 석탄층 혹은 지층에 저장되어 있던 메탄이 배출된다. 2010년 기준으로 589 $MtCO_{2eq}$.의 메탄이 석탄 채굴 시 발생되어 인류활동에 의한 메탄 배출량의 약 8%를 차지하고 있다. 주요 배출국은 석탄 채굴이 많은 중국, 미국, 러시아, 호주, 우크라이나 순이다. 세계 경제가 발전함에 따라 화석연료의 사용은 꾸준히 증가할 것으로 예상되며 석탄의 사용량도 크게 증가할 것으로 예측된다. 미국에서는 2020년 대비 2030년 약 39%의 석탄사용이 증가할 것으로 미국 에너지정보기구(U.S. Energy Information Administrations’s)에서는 밝히고 있다. 또한 중국의 급속한 경제발전에 따라 중국에서의 메탄 배출량은 2010년 대비 2030년에 약 55% 이상 증가할 것으로 예측된다[EPA, Global Mitigation of Non-CO2 Greenhouse Gases:2010-2030 (2013)]. 따라서 석탄채굴에 의한 메탄 발생량도 꾸준히 증가할 것으로 예측된다.

원유와 천연가스 생산 시 발생하는 메탄은 인위적 배출의 23%인 1,677 $MtCO_{2eq}$.를 차지한다. 원유와 천연가스 매장량이 풍부한 러시아. 미국, 이라크, 쿠웨이트, 우즈베키스탄이 전 세계 배출량의 약 50% 이상인 것으로 보고되고 있다. 천연가스는 주성분이 메탄으로 채굴, 처리공정, 수송, 분배 등 모든 공정에서 메탄의 유출이 있으며 원유도 생산과 정제 공정에서 많은 양의 메탄이 발생하는 것으로 알려져 있다. 다음 <표 5-2>는 원유와 천연가스에 의해 발생하는 메탄을 단위 공정별로 정리한 것이다.

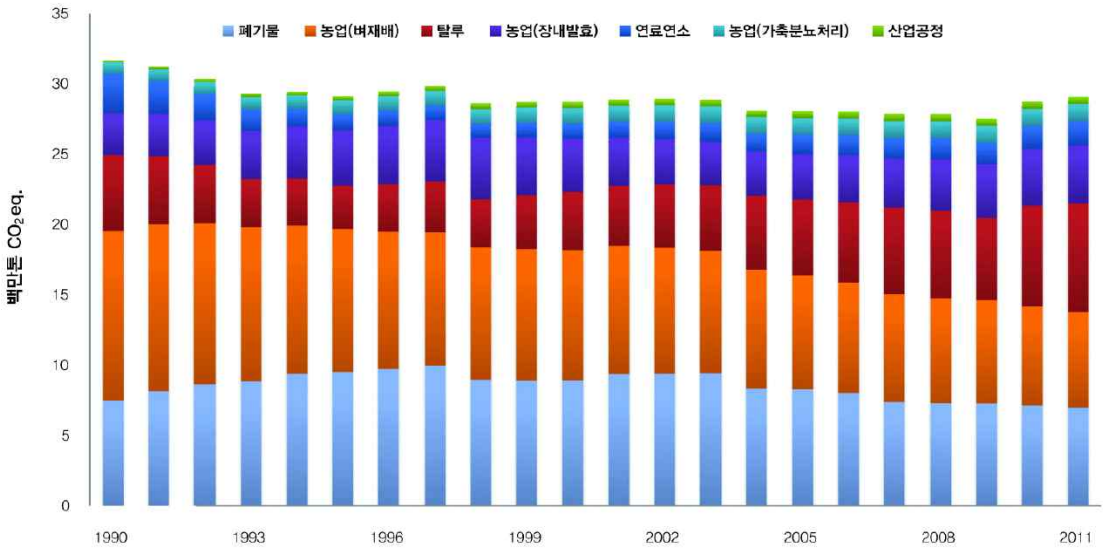
<표 5-2> 원유와 천연가스에 의한 메탄 발생 공정

Segment	Facility	Equipment at the Facility
Production	Wells, central gathering facilities	Separators, pneumatic devices, chemical injection pumps, dehydrators, compressors, heaters, meters, pipelines, liquid storage tanks
Processing	Gas Plants	Vessels, dehydrators, compressors, acid gas removal (AGR) units, heaters, pneumatic devices
Transmission and storage	Transmission pipeline networks, compressor stations, meter and pressure-regulating stations, underground injection/withdrawal facilities, liquefied natural gas (LNG) facilities	Vessels, compressors, pipelines, meters/pressure regulators, pneumatic devices, dehydrators, heaters
Distribution	Main and service pipeline Networks, meter and pressure-regulating stations	Pipelines, meters, pressure regulators, pneumatic devices, customer meters

폐기물 분야는 매립지가스 폐수 처리 등에 의한 메탄 배출을 들 수 있다. 매립지 배출 가스(LFGs: Landfill gases)는 매립된 유기물이 혐기성 조건에서 미생물에 의해 분해되는 과정에서 발생한다. LFG는 보통 유기물이 매립된 후 약 1~2년 후부터 배출되어 수십 년 동안 배출된다. 일반적으로 LFG의 50%는 메탄이며 나머지는 이산화탄소이고 소량의 휘발성유기화합물(VOCs)가 혼합되어 있다. LFG가스는 유기물(주로 음식쓰레기)을 배출하는 인구규모, 유기물 성상, 매립지 규모 등에 의해 영향을 받는다. 매립지에서 발생하는 메탄은 초기에 설명한 자연계에서의 메탄 발생과 동일한 경로를 따른다. 2010년 기준 LFG에 의해 발생되는 메탄은 약 850 $MtCO_{2eq}$.인 것으로 알려져 있다. 가정용 혹은 산업용 폐수의 처리과정에서도 약 500 $MtCO_{2eq}$.의 메탄이 발생하는 것으로 알려져 있다. 폐수에서의 메탄 발생도 매립지와 유사하게 혐기성 조건에서 폐수내의 유기물이 미생물에 의해 분해되는 과정에서 발생한다. 선진국에서는 호기성 조건에서의 폐수 처리 공정을 사용하기 때문에 메탄 발생이 상대적으로 적으나 대부분의 개발도상국에서는 혐기성 조건에서 처리되는 폐수 처리 시스템을 채용하고 있기 때문에 메탄의 발생을 피할 수 없다. 2010년 기준으로

중국, 나이지리아. 멕시코, 인도, 미국이 폐수에 의한 메탄 발생 주요 국가인 것으로 보고되고 있다.

우리나라의 메탄 배출량은 2011년 29.1 $MtCO_{2eq}$.으로 전체 온실가스 배출량의 약 4.2%를 차지하는 것으로 나타났다. 1990년 31.7 $MtCO_{2eq}$.의 배출량 보다는 약 8.1% 감소한 수치를 보였다. 분야별 메탄 배출 비중은 농업분야가 42.0%로 가장 크며 에너지 분야 32.4%, 폐기물 분야 23.9%로 나타났으며 산업공정 분야는 1.8%로 매우 적게 나타났다. 우리나라 메탄 배출량에서 가장 큰 비중을 차지하는 농업 분야는 1990년 대비 2011년 장내발효 부문에서 39.4%, 가축분뇨 처리 부분에서 49.0%, 작물 잔사소각 부문에서 1.5% 증가하였으나 벼 재배 부문에서 43.6% 감소하여 전체적으로 23.2%의 감소를 보였다. 에너지 분야의 메탄 배출은 15.2%가 증가하였으며 연료 연소에 의한 배출량은 38.6% 감소하였으나 탈루에 의한 배출은 43.5% 증가하였다. 산업 공정 분야의 배출원은 대부분 화학 산업 부문이며 증가폭은 매우 작게 나타났다. 폐기물 분야의 가장 큰 배출원은 고형폐기물 매립 부문으로 조사되었으며 이 부문의 배출량은 4.5% 감소하였고, 하·폐수 처리 부문에서도 55.6% 감소하여 전체적으로 6.9% 감소하는 경향을 보였다.



[그림 5-3] 우리나라의 분야별 메탄 발생량.

(Ref.; 온실가스종합정보센터, 2013 국가 온실가스 인벤토리 보고서, (2014))