

국내·외 국가 온실가스 인벤토리 보고서 분석을 통한 시사점 도출:

토지이용, 토지이용변화 및 임업 부문을 중심으로*

Implications from analyzing national and international GHG inventory
reports: a focus on the LULUCF sector

조소연** · 강성룡*** · 장인영****

Soyeon Cho · Sung-Ryong Kang · Inyoung Jang

요약: 기후변화의 심화에 따라 국제적으로 온실가스의 발생과 제거를 정확히 산정하고자 하는 노력들이 진행되고 있다. 유엔기후변화협약(UNFCCC)에서는 당사국에게 각 국에서 배출·흡수되는 온실가스를 산정·보고하도록 하고 있다. 특히 2024년부터는 강화된 투명성 프레임워크로 국가 온실가스 인벤토리 보고서의 고도화가 요구되고 있다. 본 연구에서는 Annex I 국가인 뉴질랜드, 일본, 미국, 독일의 2022년 국가 보고서 및 국내 보고서를 비교 분석하여 국내 보고서의 현황을 살펴보고, 향후 발전방향을 알아보고자 하였다. 그 결과, 모든 국가에서 산림지는 탄소흡수원으로 작용하고 있었으며, 습지와 정주지는 미국에서만 흡수원으로 작용하고, 다른 나라에서는 배출원으로 보고하고 있었다. 우리나라의 경우에는 산림지, 농경지, 초지, 습지 4가지 유형을 대상으로 산정하고 있었으며, 상대적으로 제한적인 탄소저장고를 대상으로 산정하고 있었다. 전체 국가의 단위면적당 LULUCF 부문에서의 흡수량은 한국($-3.77 \text{ tCO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$)>일본($-1.32 \text{ tCO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$)>뉴질랜드($-0.87 \text{ tCO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$)>미국($-0.83 \text{ tCO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$)>독일($-0.4 \text{ tCO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$) 수준이었으며, 국토 내 산림비율에 따라 결정되는 것을 확인할 수 있었다. 산정 수준 및 산정 현황을 점수화하였을 때, 우리나라는 6.94점으로 65점(일본)과 36점(독일) 사이의 점수를 기록한 타 국가에 비해 낮은 수준인 것을 확인하였다. 국내 온실가스 보고서의 고도화 및 LULUCF 부문의 정확한 산정을 위해서는 산정 항목(생태계 유형 및 탄소저장고)의 확대 및 산정방법의 고도화가 필요할 것으로 보인다.

핵심주제어: 국가 온실가스 인벤토리 보고서, IPCC, 토지이용, 토지이용변화 및 임업, 생태계 유형, 탄소저장고

Abstract: As climate change intensifies, international efforts to accurately account for greenhouse gases(GHG) emissions and removals are gaining momentum. The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) requires Parties to calculate and report the greenhouse gases emitted and absorbed within their respective territories. Beginning in 2024, national GHG inventory reports must comply with an enhanced transparency framework. This study compares and analyzes the national reports of Annex I countries to assess their current status and identify potential improvements. Specifically, the 2022 reports

* 본 논문은 환경부의 재원으로 국립생태원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIE-고유연구-2024-16).

** 주저자, 국립생태원 기후탄소연구팀 전임연구원

*** 공동저자, 국립생태원 기후탄소연구팀 팀장

**** 교신저자, 국립생태원 기후탄소연구팀 선임연구원

from New Zealand, Japan, the United States, and Germany were examined. The results indicates that forested lands act as carbon sinks in all the analyzed countries. However, wetlands and settlements serve as sinks only in the United States, while being reported as sources of emissions in the other countries. In Korea, the calculations were based on four ecosystem types: forests, agricultural land, grasslands, and wetlands, with relatively limited data on carbon stocks. The carbon uptake per unit area in Korea was found to be higher ($-3.77 \text{ tCO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$) compared to Japan ($-1.32 \text{ tCO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$), New Zealand ($-0.87 \text{ tCO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$), the United States ($-0.83 \text{ tCO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$), and Germany ($-0.4 \text{ tCO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$). This outcome was influenced by the proportion of forests in each country. When evaluating the level and methodology of calculation, Korea's score of 6.94 was significantly lower than those of other countries, which ranged from 36 (Germany) to 65 (Japan). These findings underscore the need to expand the scope of calculation items (e.g., ecosystem types and carbon stocks) and improve the calculation methodology to improve Korea's GHG reporting and accurately account for the Land Use, Land-Use Change, and Forestry (LULUCF) sector.

Key Words: National Greenhouse Gas Inventory Report, IPCC, LULUCF, Ecosystem Type, Carbon Pool

I. 서론

대기 중 온실가스의 증가는 기후변화를 야기했다. 이러한 기후변화가 심화됨에 따라, 전 세계는 기후변화의 심각성을 인지하고, 이를 극복하기 위한 노력을 기울이고 있다. 이러한 노력의 일환으로 유엔기후변화협약(UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change)에서는 당사국에게 온실가스 발생원에서의 인위적 발생 및 흡수원에서의 제거량을 산정한 국가 온실가스 인벤토리 보고서를 제출하도록 요구하고 있다. 특히, 2024년부터 적용되는 강화된 투명성 프레임워크(Enhanced Transparency Framework)에 따라 파리협정의 당사국들은 2년 주기로 격년투명성보고서(BTR, Biennial Transparency Report)를 제출하는 것이 의무화되었다. 2021년 글래스고에서 개최된 UNFCCC 당사국 총회에서 모든 당사국이 공통된 양식의 보고서를 제출하기로 합의함에 따라 2024년에 격년투명성보고서의 첫 제출을 앞두고 있다. 격년투명성보고서에는 5가지 TACCC원칙이 적용되는데, 이는 투명성(Transparency), 정확성(Accuracy), 완전성(Consistent), 비교가능성(Comparable), 일관성(Completeness)이다.

IPCC는 당사국의 보고서 작성을 위해 온실가스 산정 지침을 제공하고 있다. 이 지침은 1996년, 2006년, 2019년 3차에 걸쳐 제공되었으며(IPCC, 1996, 2006, 2019), 중간에 우수 실행보고서(IPCC, 2000) 및 특정 생태계에 대한 보완 보고서(IPCC, 2020) 등이 함께 제공되었다. 이 지침에는 각 부문별로 탄소를 산정·보고하는 방법에 대해 제공하고 있다. 이 중 토지이용, 토지 이용변화 및 임업(LULUCF, Land Use, Land Use Change and Forestry)은 보고 부문 중 유일한 탄소 흡수원으로서의 역할을 하고 있다. 이 지침에서는 토지이용을 산림지, 농경지, 초지, 습지, 정주지 및 기타토지의 6개 세부유형으로 나누어 보고하도록 되어있으며, 각각의 생태계 유형별 탄소저장고는 지상부 생물량, 지하부 생물량, 고사목, 낙엽, 토양유기물질의 5가지로 세분화하여 각각의 온실가스 흡수와 배출을 산정하는 방법을 제공하고 있다.

각 국가별로 온실가스를 산정·보고하는 방법은 크게 3가지로 나누어 지는데, IPCC에서 제공하는 산정식과 계수에 각 국가별 활동자료(면적 등)만 활용하는 Tier 1 방법과 IPCC에서 제공하는 산정식에 각 국가별로 계수를 개발하여 적용하는 Tier 2 방법, 마지막으로 국가에 적합한 고도화된 방법을 활용하여 산정·보고하는 Tier 3 방법으로 나뉜다. Tier 1에서 Tier 3로 갈수록 고도화된 방법을 사용하는 것이라고 할 수 있다. 이 지침에 따라, 우리나라도 이에 따라 국내 온실가스 발생과 흡수 현황을 담은 국가 온실가스 보고서를 국제사회에 제출하고 있으며, 2021년까지 4회 보고 하였다(ROK, 2021). 또한, 격년성투명보고서 제출이 의무화됨에 따라 기존의 온실가스 산정 방법을 살펴보고, 보완·발전 방향에 대한 고민이 필요한 시기가 되었다. 이에 본 연구는 2022년 제출된 국가 보고서를 기준으로 Annex I 국가인 독일, 일본, 뉴질랜드, 미국과 국내 보고서를 비교·분석하여 우리나라의 국가 온실가스 보고 현황을 분석하고 향후 보고 방향에 대해 제시하고자 하였다.

II. 국외 국가 온실가스 인벤토리 보고서 작성 현황

본 연구에서는 Annex I 국가 중 각 대륙별로 한 개의 나라를 지정하여 분석하였다. 특히, LULUCF 부문의 관리 방식에 따라 통합 산정·관리(뉴질랜드)와 유형별로 따로 산정·관리(미국 등)하고 있는 국가를 비교·분석하여 관련 내용을 통해 우리나라에 적합한 결론을 도출하고자 하였다. Annex I 국가들은 매년 보고서를 보고하게 되어 있어, 국내 발간 기준으로 가장 최근 자료인 2022년의 보고서를 분석 제시하였다.

1. 뉴질랜드

뉴질랜드는 -23,666.2 ktCO₂eq의 흡수량과 81.7 ktCO₂eq의 메탄(CH₄)과 271.3 ktCO₂eq 아산화질소(N₂O) 배출량으로, LULUCF 부문의 순 흡수량은 -23,313.2 ktCO₂eq였으며, 이는 뉴질랜드 총 온실가스 배출량의 -29.6%를 차지하였다(표 1). 2020년 순흡수량은 1990년 수준인 -21,229.2 ktCO₂eq에서 2,084.0 ktCO₂eq감소했다. 이는 산림에서의 흡수량 감소, 초지·습지·정주지·기타토지에서의 배출량의 증가로 전체 흡수량은 감소하였지만, IPCC에서 흡수원으로 인정하고 있는 목제품 이용(HWP; Harvested Wood Product)의 증가로 이를 상쇄한 결과라 할 수 있다(New Zealand, 2022).

〈표 1〉 1990-2020년 LULUCF 부문 뉴질랜드 온실가스 배출량(New Zealand, 2022)

토지유형 분류	순 배출량(ktCO ₂ eq)		차이(ktCO ₂ eq)	변화율(%)
	1990년	2020년	1990-2020년	1990-2020년
산림	-20,068.3	-19,704.7	363.6	1.8
농경지	476.2	382.3	-93.9	-19.7
초지	724.7	2,570.2	1,845.5	254.6
습지	-10.5	13.4	23.8	227.8
정주지	75.4	124.1	48.6	64.5
기타토지	13.6	118.4	104.8	770.3
간접 배출 (침출 및 유출로 인한 N ₂ O 배출)	40.8	17.7	-23.1	-56.6
목제품 이용	-2,481.2	-6,834.6	-4,353.4	-175.5
총 LULUCF	-21,229.2	-23,313.3	-2,084.0	-9.8

뉴질랜드의 LULUCF 부문 산정을 위한 토지의 정의는 다음과 같다. 산림의 경우, 최소면적 1ha, 수관층 피도 30% 이상, 최소 높이 1m 이상, 숲의 가장 자리의 수관의 최소 거리(숲의 최소 길이)는 30m로 정의한다. 뉴질랜드의 경우, 산림을 1990년 이전 자연림과 인공림, 1989년 이후의 산림으로 세분하여 분류하고 있다.

농경지의 경우, 1년생 농경지에는 모든 1년생 작물과 모든 경작된 맨땅, 1년생 농경지의 방풍림이 포함된다. 다년생 농경지에는 목초지, 다년생 농경지 방풍림이 포함된다. 초지는 생산성이 높은 초지와 낮은 초지로 분류되는데, 생산성이 높은 초지에는 생산성이 높은 종으로 구성된 초지, 면적 1ha 미만, 평균 너비 30m 미만인 방풍림(더 클 경우, 목본성 초지로 분류), 초지였으나 자연교란에 의해 피해를 입은 곳이 포함된다. 생산성이 낮은 초지에는 비옥도가 낮은 초지, 고산초지, 면적 1ha 미만, 평균 너비 30m 미만인 방풍림, 침식으로 인한 나지, 해안가 사구 식생이 포함된다. 목본성 초지에는 *Discaria toumatou*와 *Rosa rubiginosa*가 출현하는 초지, 활엽 관목림, 해안 관목림(<5m 이하)으로 현재의 관리방식이나 환경조건(기후, 토양)이 변하지 않을 경우, 30~40년 이상 동안 산림이 되지 않을 것으로 예상되는 경우, 고산 관목림, 골프장 등에 교목이 함께 출현하는 초지, 면적 >1ha, 너비 <30m 방풍림, 자연 교란에 의해 일시적으로 피해를 입은 목본성 초지가 포함된다.

습지는 개방수역과 식생지역으로 구분되는데, 개방수역에는 홍수, 강, 댐 및 저수지와 맹그로브를 포함한 하구-조수 지역이 포함된다. 습지식생에는 습지의 초본 및 목본식생, 맹그로브를 포함한 하구-갯벌 지역이 포함된다. 정주지에는 시가지 및 포장, 산림의 정의를 충족하지 않는 개방지를 포함한 정주지 내의 초지 및 도시공원, 도로 기반시설, 공항 및 활주로, 댐 기반시설, 건설 중인 도시 구역이 포함된다. 마지막으로, 기타토지에는 전석지 및 자갈비탈, 강 자갈, 암석 노두, 사구 및 해변, 해안 절벽, 광산 및 채석장, 영구적인 적설지 및 빙하가 포함된다.

각각의 토지이용에서의 LULUCF 부문의 배출량을 추정하기 위해 2006년 IPCC 가이드라인(IPCC, 2006)에 설명된 대로 Tier 1, 2, 3 방법의 조합을 사

용했다. Tier 2와 3 접근법을 사용한 산림, 다년생 농경지, 초지의 목본 생물량을 제외하고 나머지 토지이용의 4가지 항목(지상부 생물량, 지하부 생물량, 고사목, 낙엽층)은 Tier 1 접근법을 사용하였다. 모든 토지유형에서 유기토양의 탄소는 Tier 1 접근법을 사용하였고, 무기토양에서 유기토양으로의 변화는 Tier 2 접근법이 사용되었다. 또한, 뉴질랜드의 경우, 온실가스 통계 정보 관리를 위해 LUCAS (Land Use Carbon Analysis System) 시스템을 따로 활용하고 있다. LUCAS 데이터 관리 시스템은 LULUCF 부문에 대한 국가 온실가스 보고용 데이터를 저장, 관리 및 보관한다. 이 시스템은 토지이용 공간 데이터베이스와 방형구 데이터를 관리하고, 두 데이터 세트를 결합하여 교토 의정서 협약에 따라 보고에 필요한 데이터를 계산하는데 사용된다.

2. 일본

일본 LULUCF 부문에서의 2020년 순흡수량은 52,010 ktCO₂eq였으며, 이는 일본 전체 온실가스 배출량의 4.7%에 해당한다. 2020년 순제거량은 1990년에 비해 20.4% 감소했고 2019년에 비해서는 2.1% 증가하였다(표 2). 1990~2003년에 산림전용 면적 감소로 흡수량이 증가하고 농경지 무기토양에서의 탄소배출량이 감소했기 때문에 순제거량은 증가해왔으나, 2004년 이후로는 산림에서의 흡수량이 감소했기 때문에 전체 흡수량은 감소하는 추세였다(Japan, 2022).

〈표 2〉 1990~2020년 LULUCF 부문 일본 온실가스 배출량(Japan, 2022)

카테고리	탄소저장고	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
산림	생물량	-73,002	-79,826	-83,660	-87,626	-73,888	-62,242	-56,255
	고사목	-2,860	-3,803	-2,837	-1,082	934	1,867	1,347
	낙엽층	-2,697	-2,352	-1,774	-1,078	-567	-370	-266
	무기토양	-503	-1,625	-2,367	-2,950	-2,824	-2,344	-1,965
	유기토양	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	전체	-79,061	-87,606	-90,637	-92,636	-76,345	-63,088	-57,139

농경지	생물량	1,343	450	214	231	291	252	283
	고사목	291	58	18	31	43	26	19
	낙엽층	140	28	9	15	21	13	9
	무기토양	5,933	2,159	2,573	2,474	4,342	4,253	3,180
	유기토양	1,250	1,228	1,214	1,197	1,180	1,166	1,166
	전체	8,957	3,923	4,028	3,948	5,877	5,710	4,657
초지	생물량	106	13	-6	76	180	88	4
	고사목	41	9	3	26	67	34	8
	낙엽층	20	4	1	12	33	17	4
	무기토양	465	7	-923	-426	-128	1,196	507
	유기토양	27	28	29	28	27	38	28
	전체	659	61	-896	-284	179	1,373	551
습지	생물량	65	257	305	33	78	52	21
	고사목	17	69	82	9	23	15	4
	낙엽층	8	33	39	4	11	8	2
	무기토양	-	-	-	-	-	-	-
	유기토양	-	-	-	-	-	-	-
	전체	90	359	426	46	112	75	27
정주지	생물량	1,814	685	-559	-943	-586	-93	119
	고사목	805	560	283	224	353	367	217
	낙엽층	374	253	118	89	153	164	94
	무기토양	-267	-320	-366	-392	-380	-351	-311
	유기토양	147	115	98	87	79	64	59
	전체	2,873	1,293	-426	-935	-381	151	178
기타토지	국방시설	139.0	140.0	140.0	140.0	140.0	139.0	135.0
	해안	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0
	북방영토	503.6	503.6	503.6	503.6	503.6	503.6	503.6
	황무지	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	기타	1,830.9	1,846.8	1,838.1	1,732.9	1,771.5	1,900.2	1,886.7
	전체	2,519.5	2,536.4	2,527.7	2,422.5	2,461.1	2,588.8	2,571.3

NO(not occurring): 국가 내에서 존재하지 않는 카테고리나 과정을 의미

일본은 LULUCF 산정을 위한 토지를 분류하기 위해 2006년 IPCC가이드 라인을 참고하여 6개 유형으로 분류하였으며, 해당연도의 통계자료를 이용할 수 없는 경우 값을 보간하거나 이전 연도의 값을 대신 사용하였다. 2020년 기준, 일본의 총 토지 면적은 3,780만 ha이며, 이 중 산림이 66.1%로 가장 큰

비중을 차지했고, 농경지는 10.7%로 뒤를 이었다.

산림은 산림법에서 정의한 대로 산림실태조사 및 국가산림자원데이터베이스의 지역산림계획에 포함된 대나무림과 입목림(집중관리림, 반자연림)을 포함한다. 농경지의 경우, 농경지 및 산림지 조사(Census of Agriculture and Forestry)의 재배면적 통계자료에 따른 논, 밭, 과수원 및 황폐농지를 포함한다. 초지는 목초지, 방목지, 황무지를 산정하였는데, 초지 면적 산정에는 경영 및 식재지역 통계(Statistics of Cultivated and Planted Area), 농경지 및 산림지 조사, 토지이용실태조사(Land Use Status Survey)의 데이터를 활용하였다. 습지는 토지이용실태조사와 산림지역조사에 따른 댐, 강, 수로와 같이 물로 덮인 토지 및 정주지에 속한 강을 포함한다. 정주지는 산림, 농경지, 초지 또는 습지로 구성되지 않은 도시지역으로 도로, 주거용 토지, 학교 보호구역, 공원 및 녹지, 도로부지, 환경시설부지, 골프장, 스키장 및 토지이용현황조사에서 확인된 기타 휴양지를 말한다.

기타토지의 경우 다른 토지 유형에 묶이지 않는 나머지 모든 토지로, 일본 지리정보청이 발표한 일본의 지방자치단체 토지면적 통계 보고서에 따라 국토 총면적에서 상기 5개 토지이용 범주에 속하는 총면적을 뺀 값으로 구한다. 각각의 토지이용에서의 LULUCF 부문의 배출량으로 산림, 농경지, 초지의 CO₂는 Tier 3 수준으로 산정되며, 습지, 정주지, 기타토지의 경우 Tier 2 수준으로 산정된다. 이외에 CH₄는 Tier 1 수준, N₂O는 Tier 2 수준으로 산정된다.

3. 미국

미국의 LULUCF 부문에서 1990~2020년 사이에 순흡수량은 9.0% 감소했다. 이러한 감소는 주로 산림의 탄소 축적률 감소와 정주지로 전환된 토지의 배출량 증가에 기인한다. 구체적으로 살펴보면 1990~2020년에 유지된 정주지에서는 순 탄소 축적이 꾸준히 증가했으나, 유지된 산림과 전용된 습지는 축적이 둔화되었다. 전용된 산림, 유지된 농경지, 전용된 농경지, 유지된 습지에서는 탄소 변화가 크지 않았으나, 유지된 초지에서는 연도별 탄소 변동

이 컸다(〈표 3〉, EPA, 2022).

〈표 3〉 1990~2020년 LULUCF 부문 미국 온실가스 배출량(EPA, 2022)

카테고리	1990	2005	2016	2017	2018	2019	2020
CO ₂	-892,015	-831,126	-862,046	-826,666	-809,026	-760,821	-812,175
유지된 산림	-773,993	-687,271	-725,571	-688,301	-677,101	-634,824	-668,057
전용된 산림	-98,585	-99,068	-99,454	-99,523	-99,518	-99,520	-99,521
유지된 농경지	-23,176	-29,002	-22,731	-22,293	-16,597	-14,544	-23,335
전용된 농경지	51,784	52,032	54,107	54,273	53,975	53,935	54,380
유지된 초지	6,940	8,734	7,958	9,308	9,670	12,425	4,497
전용된 초지	-3,141	-36,951	-22,553	-22,693	-22,397	-21,485	-24,101
유지된 습지	-7,399	-6,549	-8,046	-7,954	-7,994	-8,034	-8,084)
전용된 습지	4,329	807	254	258	265	271	279
유지된 정주지	-109,567	-116,642	-123,794	-127,679	-127,299	-126,977	-126,128
전용된 정주지	60,793	82,784	77,784	77,938	77,970	77,932	77,895
CH ₄	1,087	1,236	1,131	1,359	1,226	1,022	1,523
유지된 산림: 산불	92	260	154	381	249	45	545
유지된 산림: 유기토양	1	1	1	1	1	1	1
유지된 초지: 들불	3	13	11	12	12	12	12
유지된 습지: 침수지	729	792	797	797	797	797	797
유지된 습지: 해안습지	149	151	153	153	153	153	154
유지된 습지: 이탄지	+	+	+	+	+	+	+
전용된 습지: 침수지	103	9	7	7	7	7	7
전용된 습지: 해안습지	10	10	8	8	7	7	7
N ₂ O	13	35	24	38	31	16	51
유지된 산림: 산불	6	21	13	27	19	4	39
유지된 산림: 산림토양	+	2	2	2	2	2	2
유지된 산림: 유기토양	+	+	+	+	+	+	+
유지된 초지: 들불	+	1	1	1	1	1	1
유지된 습지: 해안습지	+	1	+	+	1	1	1
유지된 습지: 이탄지	+	+	+	+	+	+	+
유지된 정주지: 토양	7	10	8	8	8	8	8

+: 절대값이 0.5ktCO₂eq를 넘지 않음

미국의 토지이용 체계는 IPCC(2006)에서 정의한 6가지 주요 토지이용 범주에 대한 정의를 사용하였으며, 국가적 상황을 반영하기 위해 미국의 토지이용

조사에서 사용되는 기준을 기반으로 개발되었다. 산림의 정의는 산림 인벤토리 및 분석(Forest Inventory and Analysis)의 산림 정의에 기초한 반면, 농경지, 초지, 정주지의 정의는 국가 자원 인벤토리(National Resources Inventory)에 기초하였다. 기타토지와 습지는 IPCC(2006)의 정의에 기초한다.

산림은 너비가 최소 120ft (36.6m)이고 면적이 최소 1ac (0.4ha)인 지역으로, 자연적 또는 인공적으로 재생된 살아있는 나무가 최소한 피도 10% 이상으로 분포하는 곳이다. 여기에서 나무란, 현장에서 다 자랐을 때 흉고직경이 최소 3in (7.6cm), 근원직경이 5 in (12.7cm), 높이가 16.4ft (5m)에 달할 수 있는 다년생 목본식물로 정의된다. 산림은 최근에 위의 조건을 충족하여 현재 재생 중이거나 가까운 미래에 해당 조건에 도달할 수 있는 모든 지역을 포함한다. 또한, 산림에는 살아있는 나무가 10% 이상 피복된 산림과 함께 비산림 사이의 지역과 도시 및 건설 토지에 인접한 산림지역과 같은 전이지대도 포함된다. 산림지역 내 미개발 도로, 산책로, 하천, 공터는 너비가 120ft, 크기가 1ac 미만인 경우 산림으로 분류된다. 그러나 기준이 임지에 대한 수목 면적 및 피복 요건과 일치하더라도 토지가 도시 또는 개발된 토지로 완전히 둘러싸여 있는 경우에는 산림으로 분류되지 않고, 이 지역은 정주지로 분류된다. 또한, 산림에는 주로 농업 토지이용에 사용되는 토지가 포함되지 않는다.

농경지의 경우, 수확에 적합한 작물 생산에 사용되는 지역을 포함하며, 이 범주에는 경작지와 비경작지가 모두 포함된다. 재배작물에는 줄뿌림 작물(row crop)과 윤작으로 함께 재배되는 목초지가 포함된다. 비경작 농경지는 연속된 건초지(continuous hay), 다년생작물(예: 과수원), 원예경작지(horticultural cropland)가 포함된다. 농경지는 골목 작물(alley cropping)과 방풍림(windbreak)과 같은 혼농임업도 포함하며, 농작물 생산을 목적으로 하는 군락 또는 조림지(woodlot)는 산림으로 분류하지 않는다. 임시 휴경지거나 보전·보호 프로그램에 등록된 토지도 산림 기준에 충족되지 않는 한 농경지로 분류된다. 고속도로, 도로, 자갈 및 비포장 도로, 철도를 포함하여 농경지를 통과하는 도로는 농경지 면적 추정에서 제외되며 정주지로 분류된다.

초지는 벼과, 사초과, 광엽초본 및 초식이 용이한 관목으로 이루어진 목초

지(pasture)와 방목장(rangeland)을 포함한다. 초지 식생을 유지하기 위해 개간, 연소, 농약처리를 적용한 지역도 포함된다. 건초 생산이 3년 이하인 토지, 사바나, 사막, 툰드라도 초지로 간주된다. 습지 중 우점하는 식물이 초지의 식물 피도 기준을 충족하는 경우에도 초지로 간주된다. 주로 초식에 용이한 벼과, 사초과, 광엽초본과 관목이 산림 기준을 충족하지 않는 경우, 산림축산(silvopasture)과 방목림과 같은 혼농임업 방식으로 관리되는 토지도 초지로 포함된다. 초지를 통과하는 고속도로, 도로, 자갈 및 비포장 도로, 철도는 초지에서 제외되며 정주지로 분류된다.

습지는 호수, 저수지, 강 외에 일년내내 또는 일시적으로 물로 덮인 토지를 의미한다. 관리습지는 수위가 인위적으로 변경되거나 인위적인 활동에 의해 생성된 습지이다. 관리습지에 해당하는 지역은 벼 재배지역과 같은 농경지, 목초지, 수로 근처의 산림지에서 중 연중 대부분 또는 일부만 침수되는 토지 등을 의미한다.

정주지는 주거용, 산업용, 상업용 부지와 같이 0.25ac(0.1ha) 이상의 단위로 구성된 개발지역을 나타내는 토지이용 범주이다. 또한, 산림, 농경지, 초원 또는 기타토지의 정의를 충족하지만, 도시 또는 건설 토지로 완전히 둘러싸인 10ac(4.05ha) 미만의 지역은 정주지에 포함된다. 다른 토지이용(예: 산림, 농경지, 초원) 내에 위치한 도로도 정주지에 포함된다. 이외에 기타토지는 나지, 암석, 빙하를 포함하고, 다른 5가지 유형에 포함되지 않는 토지 유형이다. IPCC(2006)가 제공한 지침에 따라 생물량, 낙엽층, 토양 탄소가 거의 없는 기타토지의 탄소 축적량 변화와 탄소 외 배출량은 추정하지 않지만, 유산효과(legacy effect)를 고려해 전용 후 초기 20년 동안의 탄소 및 탄소 외 배출량을 추정한다.

미국은 이러한 토지이용에서의 온실가스 인벤토리 산정을 위해 산림에서는 Tier 1, 2의 방법을, 농경지와 초지에서는 Tier 2, 3의 방법을 이용한다. 또한, 습지의 경우 Tier 1의 방법을, 정주지에서는 Tier 2의 방법을 이용하여 산정한다. 다만 기타토지의 경우에는 탄소 배출량을 따로 추정하지 않는다.

4. 독일

1990~2020년까지 독일의 LULUCF 분야는 대부분의 기간 동안 흡수원 역할을 해왔으며, 주요 요인은 산림에 의한 것이다. 산림에서 생물량과 토양의 흡수량이 많았으며, 수확된 목제품 이용도 온실가스 흡수에 크게 기여했다. 농경지와 초지는 수년에 걸쳐 지속적으로 배출량이 많았다<표 4>. 1990, 2002, 2003, 2004, 2005, 2007년의 LULUCF 부문은 폭풍 재해로 인한 목재 이용의 증가 등으로 온실가스 배출의 원인이 되었다. 온실가스 증가의 주된 요인은 이산화탄소(CO₂)이며 메탄(CH₄)과 아산화질소(N₂O)의 배출량은 상대적으로 적었다(Germany, 2022).

<표 4> 1990~2020년 LULUCF 부문 독일 온실가스 배출량(Germany, 2022)

토지유형 분류	순 배출량(kt CO ₂ -e)		변화율(%)	방법
	1990년	2020년	1990~2020년	
산림	-19,707.1	-46,252.0	134.7%	Tier 2
농경지	13,762.4	16,656.0	21.0%	Tier 2
초지	26,383.5	18,068.7	-31.5%	Tier 2
습지	3,705.8	4,452.2	20.1%	Tier 2
정주지	1,776.6	1,075.9	-39.4%	Tier 2
목제품 이용	-1,330.4	-8,651.3	550.3%	Tier 2
총 LULUCF	-21,229.2	-23,313.3	-2,084.0	

독일 산림의 경우 국가 산림 인벤토리(National Forest Inventory)에서의 산림 정의를 사용한다. 산림은 개별 또는 간별 지역, 임도, 방화벽 등을 포함하며, 이탄지, 초지, 고산초지의 경우 자연적으로 재생된 산림이 평균 연령 5년에 도달하고 면적의 최소 50%가 식생으로 덮여 있는 경우에만 산림으로 간주되지만, 농경지나 개발된 지역에 위치한 1,000m² 미만의 산림과 폭 10m 미만의 덩굴, 관목 재배지, 주거지역에 속하는 공원은 산림에 포함되지 않는다.

농경지는 연간작물재배지, 과수원, 포도밭, 홉스(hops), 종묘장, 크리스마스 트리 농장, 단기 순환 경작지(short-rotation plantation)의 7가지 하위 범

주로 구분된다. 습지와 초지의 경우 IPCC(2006)의 지침에 제시된 정의를 따른다. 습지의 경우, 토양이 간헐적 또는 지속적으로 물에 잠기는 지역으로서 초본으로 덮인 지역과 산림 범주에는 속하지 않지만 교목과 관목으로 덮인 지역의 두 개의 하위 범주로 구분된다. 정주지 역시 IPCC(2006) 지침에 따라 정의되며, 식생으로 덮여 있는 비포장도로가 상당부분 포함된다. 마지막으로 식생이 없는 지역과 현재 정의되지 않은 지역은 기타토지로 분류된다.

독일 LULUCF 부문의 순배출량을 추정하기 위해 2006년 IPCC 가이드라인(IPCC, 2006)에 의해 산림, 농경지, 초지, 정주지의 경우 Tier 1, 2의 산정방법이 이용되었으며, 습지의 경우엔 Tier 1의 방법으로 산정되었으며, 기타토지는 산정하지 않았다.

Ⅲ. 국내 국가 온실가스 인벤토리 보고서 작성 현황

우리나라는 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 시행령」 제39조에서 분야별로 온실가스 정보 및 통계를 보고할 것을 의무화하고 있다. 토지이용별 산정기관에서 온실가스 배출 및 흡수를 산정하면 이를 온실가스정보센터에서 취합·관리하여 매년 국가 보고서로 발간하고 있다. 토지이용별 담당 산정기관은 아래 <표 5>와 같다. 발간된 보고서는 영문으로 번역되어 UNFCCC에 격년 업데이트 보고서(Biennial Update Report)의 형태로 제출되며, 최근에는 제4차 보고서가 2021년에 보고되었다.

우리나라의 경우 LULUCF 산정을 위해 IPCC(2006)의 가이드라인에 따라 6가지 카테고리를 적용하고 있다. 우리나라의 경우 토지이용 면적과 관련하여 산정기관별로 서로 다른 기준을 적용하고 있으며, 산림지의 경우, 임상도를 기준으로, 농경지는 농업면적조사 자료, 습지와 초지, 정주지는 지적통계에서의 자료를 활용하고 있다. 산정방법의 경우 산림지는 국립산림과학원에서 2003년의 LULUCF 우수산정지침과 2006년 가이드라인을 기준으로 임목 바이오매스, 임상별 목재기본밀도, 바이오매스확장계수, 뿌리-지상부 비율

에 국가 고유 흡수계수를 적용하여 Tier 2 수준으로 산정하고 있다. 또한, 토지이용변화와 관련해서는 통계의 부재로 타토지에서 전용된 산림지의 이산화탄소 배출량을 산림지로 유지된 산림지에 포함하여 보고하고 있다. 농경지에 대해서는 국립농업과학원에서 온실기체의 흡수 및 배출에 대한 산정을 진행하고 있으며, 2009년부터 농업분야 재배부문 국가 온실가스 배출량 산정에 필요한 계수를 개발하고 있다(정현철·최은정·이종식·김진엽·이선일, 2017). 초지 부문은 국립축산과학원에서 국내의 목장용지인 목초지를 대상으로 배출 및 흡수량을 산정하고 있다. LULUCF에 따른 탄소 흡수원 증대를 위한 실증적 자료 확보를 위해 2010~2012년 목초지 식물체의 이산화탄소 이출입, 탄소량, 토양 내 탄소량 측정에 관한 연구를 진행하고 있으며, 이 밖에 초지의 탄소흡수량 증대를 위해 목초의 초종, 파종시기, 식생변화, 봄경운 등이 생산성에 미치는 영향을 연구하고 있다(유가영·김현진·김예솔·정민웅, 2012; Park, Kim, Hyun, Jung, and Yoo, 2023). 또한, 2020년 현재 정주지 부문의 국내 온실가스 인벤토리 산정은 미산정으로 국제사회에 보고되고 있으나, '21년 국토교통부 정주지 부문 국가 온실가스 통계산정' 연구에 의하면, 정주지 부문의 활동자료 및 계수 부재로 미산정된 국내 현황을 고려하여 활동자료 없이 산정가능한 Tier 1 수준을 목표로 통계산정 및 관리를 위한 운영방안을 수립하고 있다(국토교통부, 2021).

IV. 국내·외 국가 온실가스 인벤토리 보고서 비교 분석

2022년 국가보고서에 따르면, LULUCF 부문의 국가별 온실가스 배출량 분석 결과, 모든 국가에서 산림은 흡수원으로 산정되고 있으며, 습지와 정주지는 미국에서만 흡수원으로 보고되었다.〈표 5〉. 각 토지 유형별 단위면적당 흡수율은 산림($-6.5 \sim -1.9 \text{ tCO}_2\text{eq ha}^{-1}$) 정주지($-1.0 \sim 0.5$) 초지($-0.02 \sim 2.7$) 농경지($0.2 \sim 1.4$) 습지($-0.1 \sim 6.0 \text{ tCO}_2\text{eq ha}^{-1}$)으로 산림에서 가장 높은 값을 나타내었다. Lorenz (2013)의 연구에서도 산림 생태계가 육상생태계 탄소흡

수의 절반(123 PgC yr^{-1})을 담당하고 있으며, 그 뒤를 이어 농경지($0.8 \text{ MgC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)와 초지($0.2 \text{ MgC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)라고 보고하고 있다. 각 국가별 LULUCF 부문에서의 흡수는 미국>일본>대한민국>뉴질랜드>독일 순으로 나타났다. 이를 국가 면적으로 나누어 비교해보면 단위면적별 흡수량은 한국($-3.77 \text{ tCO}_2\text{eq ha}^{-1}$)>일본($-1.32 \text{ tCO}_2\text{eq ha}^{-1}$)>뉴질랜드($-0.87 \text{ tCO}_2\text{eq ha}^{-1}$)>미국($-0.83 \text{ tCO}_2\text{eq ha}^{-1}$)>독일($-0.4 \text{ tCO}_2\text{eq ha}^{-1}$)의 순으로 나타난다. 일본과 한국의 경우 온실가스 흡수원에 있어 중요한 역할을 하는 산림이 60%가 넘는 나라로 이에 따른 단위면적당 흡수율이 높게 나타난 것으로 보이며, 반면 뉴질랜드, 미국, 독일은 국토에서 산림이 차지하는 면적이 각각 38%, 33%, 32%로 상대적으로 낮은 산림비율을 갖고 있어 단위면적당 흡수율이 낮게 나타난 것으로 보인다.

〈표 5〉 2020년 LULUCF 부문 국내·외 온실가스 배출량 비교

토지유형	2020년 순 배출량 (kt CO ₂ eq.)				
	대한민국	뉴질랜드	일본	독일	미국
산림	-40,500	-19,705	-57,139	-46,252	-767,578
농경지	2,800	382	4,657	16,656	31,045
초지	-20	2,570	551	18,069	-19,604
습지	300	13	27	4,452	-7,805
정주지	-	124	178	1,076	-48,233
기타토지	-	118	2,571	-	-
목제품이용	-500	-6,835	-807	-8,651	-
합계	-37,900	-23,331	-49,962	-14,651	-812,176

각 국가별 토지유형 및 탄소저장고별 산정 수준은 〈표 6〉과 같다. 〈표 6〉에서 살펴보면, 우리나라는 상대적으로 현존량을 제외한 다른 탄소저장고에 대한 산정이 이루어지지 않고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 정주지와 기타토지에 대한 산정이 이루어지지 않고 있어 이에 대한 보완이 필요한 것으로 보인다. 산정 수준에 있어서도 타국가들이 Tier 2, 3 수준으로 산정하고 있는 것에 반해 아직 대부분의 토지이용 및 탄소저장고에서의 산정이 Tier 1 수준으로 이루어지고 있어, 국가계수의 개발 및 국가에서 활용 가능한 모형의 개발

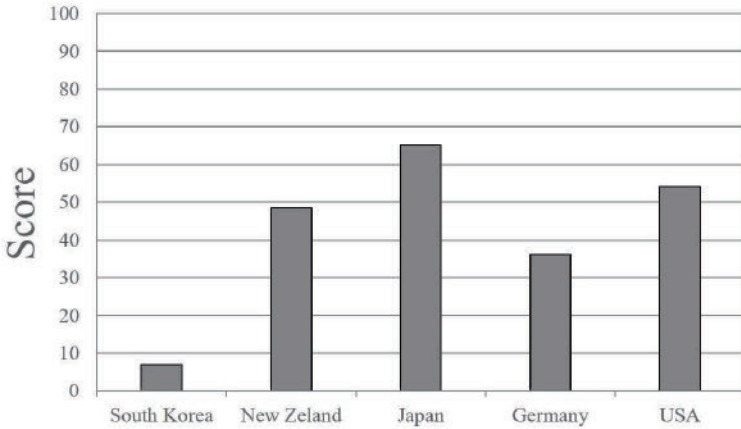
이 시급한 것으로 보인다.

〈표 6〉 국내·외 온실가스 산정수준

			산림	농경지	초지	습지	정주지	기타토지
한국	현존량		Tier 2	-	-	-	-	-
	고사유기물		Tier 1	-	-	-	-	-
	토양 탄소	무기	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	-	-
		유기	Tier 1	-	-	-	-	-
뉴질랜드	현존량		Tier 2, 3	Tier 1, 2	Tier 1, 2	Tier 1	Tier 1	Tier 1
	고사유기물		Tier 2, 3	Tier 1, 2	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1
	토양 탄소	무기	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2
		유기	Tier 1	Tier 1	Tier 1	Tier 1	-	-
일본	현존량		Tier 2	Tier 2	Tier 1	Tier 2	Tier 2	Tier 2
	고사유기물		Tier 3	Tier 1, 2	Tier 1, 2	Tier 2	Tier 2	Tier 2
	토양 탄소	무기	Tier 3	Tier 3	Tier 3	Tier 1	Tier 2	Tier 3
		유기	Tier 1, 2	Tier 1, 2	Tier 1	Tier 1	Tier 2	-
독일	현존량		Tier 2	Tier 2	Tier 2	-	-	-
	고사유기물		Tier 2	Tier 2	Tier 1, 2	-	-	-
	토양 탄소	무기	Tier 2	Tier 2	Tier 2	-	Tier 2	-
		유기	Tier 1	Tier 1, 2	Tier 1	Tier 1	Tier 1	-
미국	현존량		Tier 2	Tier 2	Tier 3	Tier 1	Tier 2	-
	고사유기물		Tier 2	Tier 2	Tier 3	Tier 1	Tier 2	-
	토양 탄소	무기	Tier 2	Tier 3	Tier 2, 3	Tier 1	Tier 2	-
		유기	Tier 1	Tier 2	Tier 2	Tier 1	Tier 2	-

전체 토지이용과 전체 탄소저장고에 Tier 3 수준의 평가 방법을 적용하여 평가 하였을 때를 100으로 가정하여 (24개 항목, 3개 수준), 각 국가별 점수를 매겨 보았다. 그 결과, 우리나라의 경우 100점 만점에 6.94점을 기록하고 있어 일본(65점), 미국(54점), 뉴질랜드(49점), 독일(36점)에 비해 많은 개선이 필요함을 알 수 있었다 <그림 1>.

〈그림 1〉 2020년 LULUCF 부문 국내·외 온실가스 배출량 산정 수준 점수



V. 결론

이 연구는 Annex I 국가인 뉴질랜드, 일본, 독일, 미국의 2022년 국가보고서 및 국내 보고서를 비교·분석하였다. 뉴질랜드의 경우 산림과 목제품 이용이 온실가스 흡수원으로 작용하고 있었으며, 경작지에서 가장 많은 온실기체가 발생하는 것으로 확인되었다. 특히 습지의 경우 1990년에는 흡수원이었지만, 2020년에는 배출원으로 작용하고 있었다. 뉴질랜드의 경우, LUCAS라는 시스템을 통해 토지이용 및 토지이용 변화와 해당 토지이용에서 흡수·배출되는 온실가스를 통합관리하고 있는 것이 특징적이었다. 일본의 경우, 5개 국가 중 가장 많은 유형에서 가장 많은 탄소저장고를 높은 수준(Tier 2, 3)으로 산정하고 있는 것으로 나타났다. 일본의 경우 2020년 기준 산림에서만 온실가스를 흡수하고 있는 것으로 나타났으며, 다른 토지이용의 경우 배출원에 해당하였다. 미국의 경우엔 산림과 유지된 농경지, 전용된 초지, 유지된 습지, 유지된 정주지가 흡수원에 해당하였고, 다른 토지이용의 경우에는 배출원에 해당하였다. 독일의 경우에는 산림에 의한 흡수가 많이 나타났으며, 일부 기간에는 온실가스 배출원으로 작용하기도 하였다. 우리나라의 경우, 산림이 가장 큰 온실가스의

흡수원이었으며, 다른 토지의 경우 배출원에 해당하였다.

산정 수준을 살펴보았을 때, 우리나라의 경우 다른나라에 비해 산정 생태계(즉, 정주지 누락 등) 및 산정 탄소저장고에 대한 제한이 있었으며, 산정 수준 역시 타 국가에 비해 낮은 수준으로 산정하고 있다는 것을 알 수 있었다. 2024년부터 새로운 프레임워크로의 전환이 시작되는 만큼, 우리나라도 온전성 확보를 위해 지금까지 산정하지 않았던 생태계나 탄소저장고 등에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 나아가 LULUCF 부문의 정확한 산정을 위한 산정 수준의 고도화 역시 중요하겠다.

각 나라별 보고서를 분석해 보았을 때, LULUCF 부문의 가장 기본이 되는 토지이용의 정의가 다양하게 나타남을 볼 수 있었다. 2024년부터 적용되는 격년성 투명 보고서의 경우 토지의 온전성을 강조하고 있어, 토지이용의 분명한 정의가 필요할 것으로 보인다. 또한, IPCC에서 각 토지이용으로 유지된 토지와 토지유형으로 전용된 토지를 함께 고려하여 산정·제시하게 되어 있으므로, 토지이용 변화에 대한 통계를 마련하는 것도 중요할 것으로 보인다.

■ 참고문헌 ■

- 국토교통부, 2021, “2021년 정주지 부문 국가 온실가스 통계 산정 연구.”
- 유가영·김현진·김예솔·정민웅, 2012, “목초재배지 및 벼논 관리 변화에 따른 토양 탄소 및 미생물 활성도,” 『한국토양비료학회지』, 45(3), pp.435-443.
- 정현철·최은정·이종식·김건엽·이선일, 2017, “최근 5년간 농업부문 온실가스 산정방법 개선과 그에 따른 배출량 차이 분석,” 『한국기후변화학회지』, 8(4), pp.347-355.
- EPA, 2022, *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2020*. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 430-R-22-003
- Germany, 2022, *National inventory report for the German greenhouse gas inventory 1990-2020*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1996, *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Reference manual*, 3.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2000, *IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006, *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Institute for global environmental strategies, Hayama, Kanagawa, Japan.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014, *2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands*. IPCC, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019, *2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Agriculture, forestry and other land use*.
- Japan, 2022, *National Greenhouse Gas Inventory Report of JAPAN*.
- Lorenz, K., 2013, *Ecosystem carbon sequestration*. Ecosystem services and carbon sequestration in the biosphere, 39-62.
- New Zealand, 2022, *New Zealand's greenhouse gas inventory 1990-2020*. Ministry for the Environment, New Zealand.
- Park, Y. L., Y. J. Kim, J. G. Hyun, Jung, J. S. and G. Yoo, 2023, "Assessing Soil Organic Carbon Stock and Stability in Volcanic Grasslands: Implications for Climate Change Mitigation Potential and Management Levels, " *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 56(4), pp. 342-353.
- Republic of Korea (ROK), 2021, *Fourth Biennial Update Report of the Republic of Korea*. Ministry of Environment, Greenhouse Gas Inventory and Research Center.

조소연: 강원대학교 생명과학과 대학원과정에서 이학 박사학위를 취득하고 현재 국립생태원 기후탄소연구팀에 재직 중이다. 연구분야는 식물생태학이고, 주요 저술로는 "Synergistic Effect of Dwarf Bamboo Flowering and Wild Boar Rooting on Forest Regeneration" 등 다수가 있다(sycho@nie.re.kr).

강성룡: 미국 루이지애나주립대학교에서 박사학위를 취득하고 현재 국립생태원 기후탄소연구팀 팀장으로 재직 중이다. 생물다양성 평가, 탄소-생물다양성 연계 평가 등과 관련한 연구를 진행하고 있다(srkang@nie.re.kr).

장인영: 연세대학교 토목환경공학과에서 박사학위를 취득하고 현재 국립생태원 기후탄소연구팀에서 선임연구원으로 재직 중이다. 현재 생태계의 탄소 산정에 관한 연구를 진행하고 있다(iyjang@nie.re.kr).

투 고 일: 2024년 11월 07일
심 사 일: 2024년 11월 20일
게재확정일: 2024년 12월 08일