Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 34, No. 5: 1589-1597/ October, 2014
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2014.34.5.1589

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Construction Management **시공관리**

건설사업의 온실가스 모니터링 시스템 개발

김태영* · 박희성**
Kim, Tae Yeong*, Park, Hee-Sung**

Development of a Greenhouse Gas Monitoring System for Construction Projects

ABSTRACT

For several decades, economic growth has achieved in the aspect of productivity and effectiveness not environmental friendly. As a result, global warming is a major agenda to solve. Therefore, global effort to sustainable development has been adopted like UNFCCC and Kyoto protocol that aimed to reduce greenhouse gas. However, the construction industry has only focused on applying techniques for using less energy sources not monitoring sustainable construction and development. Therefore, this study developed a tool for monitoring greenhouse gas emissions in construction industry. The proposed system evaluates and estimates BAU (Business as usual) for each phase of a construction project. For this purpose, analyzed the greenhouse gas emission factors coincide to life cycle of a construction project. The scope of monitoring is determined according to data availability and emission factor. Then, the system framework is developed and the calculation logic is proposed the system features provide comparison between the emission estimates for eco-friendly design and the actual emission of construction and operation phases. The system would be utilized as a tool for supporting to green construction realization and green construction performance evaluation.

Key words : Monitoring system, Greenhouse gas, Green construction

초 록

지난 수십 년간의 경제성장은 환경보다는 생산성과 효율성을 중시하며 진행되었다. 그 결과, 현재 전 세계는 인류의 생존을 위협하는 지구온난화라는 심각한 환경위기에 직면하게 되었다. 이에 따라 온실가스 감축과 지속가능한 발전을 위한 국제적 노력으로 '기후변화에 관한 UN협약(UNFCCC)'과 '교토의정서(Kyoto Protocol)'가 공식 발효되었다. 그러나 건설 산업의 노력은 에너지 저감 기술의 개발과 적용에 치중되어있다. 따라서 본 연구는 건설 산업의 온실 가스배출량을 모니터링 하기 위한 시스템을 개발하였다. 본 연구에서 제안한 모니터링 시스템은 온실가스 배출전망치와 실제배출치의 산정을 통해 단계별로 모니터링하고 이를 비교·평가한다. 이를 위해, 건설 프로젝트의 일반적인 생애주기에 따르는 온실가스 배출요인을 분석하였으며, 이를 설계도서 등 기초 데이터자료의 수집용이성, 배출계수의 구축여부를 기준으로 본 연구의 온실가스 모니터링 분석범위를 결정하였다. 또한, 사업단계별 배출량 산정방법의 구축을 통해 모니터링 시스템을 구축하였다. 본 연구의 모니터링 시스템은 설계시점에서 배출전망치 산정을 통한 친환경적인 의사결정과 실제 시공 및 운영시점에서 실제 배출치 산정을 통한 녹색건설현장 구현, 그리고 배출전망치와 실제 배출치 간의 비교·평가를 통한 녹색건설 성과평가 지원도구로 활용이 기대된다.

검색어 : 모니터링 시스템, 온실가스, 녹색건설

* 한국건설기술연구원 국가건설기준센터 연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · disco772@nate.com)
** 정회원 · 교신저자 · 국립한밭대학교 건설환경공학과 부교수 (**Corresponding Author** · Hanbat National University · jackdaniel@hanbat.ac.kr)

Received February 17, 2014/ **revised** March 17, 2014/ **accepted** July 30, 2014

Copyright ⓒ 2014 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

지난 수십 년간의 경제성장은 환경보다는 생산성과 효율성 측면으로 진행되며 무분별한 에너지의 소비에 의해 지구의 오존층을 파괴시키는 온실가스 배출을 초래하였다. 이로 인해 발생된 이상기후 현상에 의한 경제적 손실은 매년 세계 GDP (Gross Domestic Product)의 5~20%에 이를 것으로 전망되고 있다(Stern 2009). 이에 지구온난화에 대한 범지구적 차원의 노력이 필요하다는 인식이 확산되면서 2005년 '교토의정서(Kyoto Protocol)' 발효를 통해 국제적이고 구속력 있는 온실가스 배출규제가 시행되고 있다.

우리나라는 교토의정서에 개발도상국으로 분류되어 온실가스 감축에 대한 의무는 없으나, OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) 국가 중 온실가스 배출량 세계 9위, 온실가스 배출량 증가율 1위 국가로써(IEA, 2009), '저탄소 녹색성장(Low Carbon, Green Growth)' 국가비전을 선포하고 2020년까지 배출전망치(BAU, Business As Usual) 대비 30% 감축을 목표로 온실가스 목표관리제, 탄소배출권거래제의 시행 등 체계적인 관리와 감축을 위한 기반을 구축하고 있다.

총 CO_2 배출의 42%를 차지하고 있는 건설 분야는(Song et al., 2011) 녹색성장을 위한 정책을 수립하여 시행하고 있다. 그러나 주로 에너지 저감기술을 적용하여 사용단계의 온실가스 발생 최소화에 초점이 맞춰져있다. 그러나 건설자재의 생산, 가공 및 시공과정에서 발생되는 온실가스 비중이 10%~20%에 이르는 등 사용단계 이외의 단계에서 많은 온실가스가 발생되는 것으로 추정된다. 또한, 자재운송까지 고려할 경우 시설물과 직·간접적으로 연관된 탄소배출량 비중은 더 커질 것으로 판단되므로 건설 분야의 온실가스 관리는 사용단계에만 국한하지 않고 전생애주기적 관점에서 추진되어야 한다(Kim et al., 2010). 또한 기존의 온실가스 배출량 측정을 위한 LCA (Life Cycle Assessment) 또는 기타 온실가스 산정 프로그램은 복잡한 구성에 의한 사용편의성의 한계, 데이터 구축을 위한 자료수집의 한계, 입력 데이터의 과다 등에 의해 활용도가 낮은 실정이다. 따라서 본 연구를 통해 활용가능한 건설단계별 온실가스 모니터링 시스템을 제시하였다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 도로, 철도, 댐, 항만, 건축물 등의 시설물을 대상으로 건설 활동에 의해 발생되는 온실가스 배출량을 효과적으로 관리하기 위한 모니터링 시스템을 제시하였다. 세부적으로는 건설공사의 생애주기를 기획 및 설계, 시공, 운영, 해체 및 재활용단계로 구분하여 각 단계별 온실가스 배출 영향요인을 도출하고, 각 영향요인에 대한 온실가스 산정방법을 제시하였다. 그리고 이를 통해 해당 건설공사에 의해 발생되는 온실가스를 공정별, 일정별로 구분하여 모니터링 할 수 있도록 하였다. 이를 위해 본 연구는 Fig. 1과 같이 국내외 기후변화관련 정책 및 대응방안을 분석하여 본 연구의 필요성을 증명하였다. 그리고 온실가스 배출 영향요인과 온실가스 배출량 산정방법론의 고찰을 통해 이론적 토대를 마련하였다.

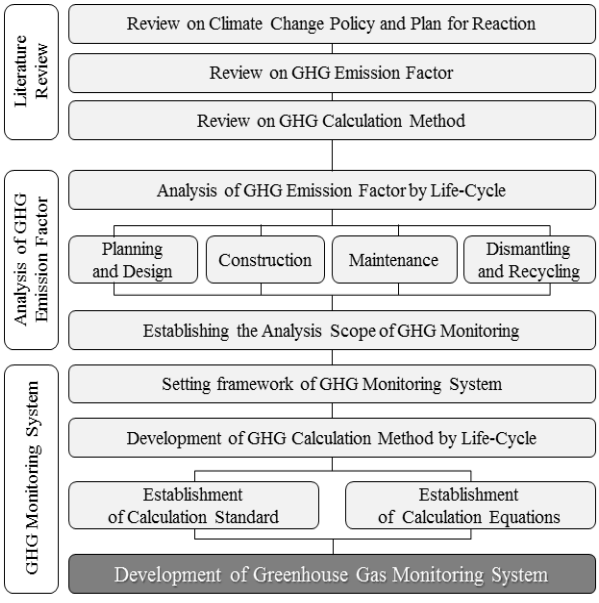


Fig. 1. Research Process

이를 통해, 본 연구는 건설단계별 온실가스 배출 영향요인을 도출하여 모니터링을 위한 분석영역을 설정하였다. 그리고 도출된 각 영향요인에 대한 온실가스 배출량 산정방법을 기존 연구의 방법론을 활용하여 구축하였다. 그 후, 건설사업의 단계별, 일정별 온실가스 모니터링을 위한 시스템을 개발하였다. 그리고 프로젝트 진행시 수집이 용이한 자료를 활용하여 데이터 구축을 간소화하고, 입력데이터와 산정수식의 단순화를 통해 사용자 편의성을 향상시켰으며 국가 고유 온실가스 배출계수를 활용하여 정확성을 높였다.

2. 기후변화정책 및 이론적고찰

2.1 국내외 기후변화관련 정책 및 대응방안

2.1.1 국제사회의 정책 및 대응방안

지구온난화에 대한 범지구적 차원의 노력은 1988년 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 설치를 시작으로, UNCED (United Nations Conference on Environment and Development)에서 '기후변화에 관한 UN협약'을 채택하였다. 이후 1995년 제1차 당사국총회에서 2000년 이후의 온실가스 감축논의를 시작으로 매년 국제적인 온실가스 관리를 위한 노력을 지속하

고 있다.

특히, 강제적인 온실가스 감축에 대한 구속력이 없는 기후변화협약의 한계 극복과 온실가스의 실질적인 감축을 위하여 1997년 교토에서 열린 제3차 당사국총회에서 '교토의정서'를 채택하여 2005년 공식 발효하였다. 교토의정서는 38개국의 선진국을 대상으로 제1차 공약기간(2008년~2012년)동안 1990년도 배출량 대비 평균 5.2% 감축을 주요 골자로 각국의 여건에 따라 -8%~+10%까지 차별화된 감축량을 규정하고 있다. 이에 따라 기후변화와 관련된 국제사회의 정책 및 대응방안 또한 기후변화의 원인을 온실가스의 배출로 규명하고 온실가스 배출량 감축목표 설정을 통해 효율적 관리와 감축을 위한 방안을 마련하고 있다. 주요 국가의 온실가스 감축목표는 2020년까지 EU (European Union)와 영국은 1990년 대비 각각 20%와 34%, 미국과 일본은 2005년 대비 각각 17%와 15%의 감축목표를 수립하고 있다. 이들은 감축목표의 효율적인 달성을 위해 자국의 실정에 맞는 정책을 수립하여 추진하고 있다. 특히, 주요 감축수단 제시한 교토 메커니즘의 배출권거래제를 적극적으로 실시하거나 추진하고 있으며, 기존 온실가스 배출에 큰 영향을 미치고 있는 화석연료의 사용을 줄이기 위한 신재생에너지의 확대 보급 등 국가차원의 세부 정책을 수립하여 시행중에 있다.

2.1.2 국내의 정책 및 대응방안

우리나라도 세부적인 대응방안에서는 차이가 있으나, 온실가스 감축목표의 설정과 달성을 위한 정책의 설정 등에서 국제사회의 대응방안과 큰 틀을 같이 하고 있다. 우리나라의 경우 교토의정서상에 개도국 지위를 유지하고 있어 온실가스 감축에 대한 의무는 없다. 그러나 2020년 온실가스 배출전망치 대비 30%의 감축목표를 수립하면서 2010년 '저탄소 녹색성장 기본법'을 통해 3대 비전, 10대 정책방향을 수립하고 시행하고 있다. 그리고 온실가스의 효율적이고 효과적인 절감을 위해 기존의 '온실가스 목표관리제'에서 2015년부터는 '온실가스 배출권거래제'를 시행함으로써 법적·제도적 틀을 구축해 지속적인 녹색성장 체제 정착에 기여할 것으로 예상된다.

현재 우리나라 건설 분야는 '온실가스 배출권거래제'에는 포함되지 않았으나, '건설업 온실가스에너지 목표관리제'가 2014년부터 본격 시행될 예정이다. 그러나 지금까지 건설 분야의 노력은 사후처리기술과 관련된 요소기술 개발에 치중되어있고, 이를 평가하여 체계적으로 관리하는 기술에 대한 연구는 미미한 실정으로(Kwon, 2009), 건설 활동이 지구온난화에 미치는 환경영향조차 파악하지 못하고 있다(Kim et al., 2004). 따라서 건설 분야의 녹색정책은 건설 산업에서 발생되는 온실가스의 정확한 산정이 선행되어야 한다.

2.2 환경영향요인에 관한 연구

건설 산업의 온실가스 배출에 영향을 미치는 요인에 대한 전생애주기(Life Cycle)적 관점의 연구는 건설공사를 원자재생산, 시공, 유지 및 관리, 해체 및 재활용의 4단계로 구분하고 설계서, 내역서 등을 활용하여 데이터 구축이 용이한 온실가스 배출 영향요인을 도출하여 영향요인에 대해 건설공사와 온실가스 배출요인 사이의 관계를 시스템 다이내믹스의 인과지도를 활용하여 제시한 연구가 있다(Bae and Park, 2012).

그 외는 시공단계에 큰 영향을 미치는 착공 전 단계의 정보를 이용하여 건설프로젝트의 환경적합성 평가를 위하여 건설생산 프로세스의 범위를 생산-시공단계로 한정하고 시공계획의 설계성과물(도면, 시방서, 내역서 등)과 무관한 프로세스를 제외한 생산단계, 운송단계, 양중단계, 시공단계의 환경영향요인을 분석한 연구가 있다(Chun et al., 2009). 그리고 이산화탄소 배출량 평가를 위한 고려요소로써 건축물의 전생애주기 중 시공단계에 범위를 한정하여 이산화탄소 배출요인을 크게 자재, 운송, 현장시공, 기타요인으로 대분류한 후, 각 요인들을 다시 소분류 항목으로 구분하여 각 요인에 대한 분석 범위설정과 분석방법의 제시를 통해 건축물 시공단계에서의 이산화탄소 배출요인 분류체계를 제시한 연구이다(Hong et al., 2011).

국외의 경우는 건설 분야의 온실가스 배출요인을 연료의 사용, 전력의 사용, 건설자재의 사용으로 구분하여 공회전, 운전 숙련도, 자재의 재활용 및 재사용 등의 부문별 세부적인 영향요인을 도출하여 온실가스 배출의 저감방안을 제시한 연구가 대표적이다(Peter, 2009). 그러나 이러한 연구는 시공단계의 영향요인 또는 제한적인 분석에 국한되어 있어 건설 산업 전반에 걸친 온실가스 배출량 분석에 제한적이다.

2.3 온실가스 배출량 산정방법

온실가스 배출량의 산정은 크게 직접적 방법과 간접적 방법으로 구분할 수 있다. 먼저 직접적 방법은 측정기를 이용하여 농도, 유량 등을 직접 측정하여 산정하는 방법이다. 연료 연소과정이 반영되어 최종 배출량에 대한 정확한 정보를 구할 수 있다는 장점이 있지만, 장비의 설치와 운영에 많은 시간과 비용이 소요되는 점과 측정의 제한성 등의 단점이 있다. 그리고 간접적 방법은 연소되는 연료의 종류와 양, 연소효율 및 배출계수 등을 고려하여 배출량을 이론적으로 추정하는 방법이다. 이는 산정이 용이하다는 장점이 있으나 계수를 통한 방법으로 자료의 정확성, 신뢰성이 떨어진다는 단점이 있다(Kim, 2007). 현재 온실가스 배출량 측정은 IPCC에서 제시한 가이드라인의 배출계수를 활용하여 측정하는 간접적 방법이 주로 사용되고 있다.

Table 1. GWP (Global Warming Potential)

Greenhouse Gas	Chemical Formula	GWP
Carbon dioxide	CO_2	1
Methane	CH_4	25
Nitrous oxide	N_2O	298
Hydrofluorocarbons	HFCs	124 ~ 14,800
Perfluorocarbons	PFCs	7,390 ~ 12,200
Sulphur hexafluoride	SF_6	22,800

※ Based on IPCC Guideline

2.3.1 IPCC가이드라인

IPCC는 유엔 산하의 기구가 각국의 환경 관련전문가로 구성한 정부 간 협의체로 1996년과 2006년 온실가스 배출량 측정의 기준을 정립한 가이드라인을 제시하였다. 현재 미국, 일본, 호주, 유럽 등의 국가에서 IPCC의 가이드라인(IPCC, 2006)을 사용하고 있다.

IPCC 가이드라인에서 제시하는 CO_2 배출량 산정방법은 활용데이터와 분류 기준, 국가 고유의 온실가스 배출계수의 구축여부에 따라서 각각 Tier1, Tier2, Tier3의 3가지 방법으로 구분된다. Tier1방법은 IPCC의 기본 계수값(Default)을 이용하는 가장 단순한 방법이며, Tier2는 국가고유의 온실가스 배출계수, Tier3는 국가고유의 온실가스 배출계수, 모형, 사업장 단위 등의 보다 상세한 자료를 이용해야 하는 산정방법이다. 온실가스 산정의 정확성은 Tier3로 갈수록 높으며, Tier2 이상의 작성방법은 국가고유의 온실가스 산정방법으로 간주된다.

CO_2를 비롯한 N_2O, CH_4 등의 온실가스 종류별 배출량의 산정은 Table 1과 같은 GWP (Global Warming Potential)를 이용하여 대표적인 온실가스인 CO_2에 상응하는 값인 CO_2-e (CO_2-equivalent)로 환산하여 산정한다.

2.3.2 IPCC가이드라인에 의한 온실가스 산정방법

Tier1방법은 각각의 배출원에서 사용되는 연료소비량과 배출계수를 이용하여 온실가스 배출량을 산정하는 방법이다. IPCC 가이드라인은 연료의 평균적인 온실가스 배출계수를 제공하고 있으며, Eq. (1)을 활용하여 각 연료별 산정된 온실가스 배출량의 총합으로 Eq. (2)를 통해 총 온실가스 배출량을 산정한다.

$$E_{GHG,\ fuel}(\text{kg GHG}) = F{\cdot}C_{fuel}(\text{TJ}){\cdot}\ E{\cdot}F_{GHG,\ fuel}(\text{kg GHG/TJ}) \quad (1)$$

$$E_{GHG}(\text{kg GHG}) = \sum_{fuels} E_{GHG,\ fuel}(\text{kg GHG}) \quad (2)$$

여기서 $E_{GHG,\ fuel}$은 연료유형에 의한 온실가스 배출량, $F{\cdot}C_{fuel}$은 연소된 연료의 양, $E{\cdot}F_{GHG,\ fuel}$은 연료유형에 의한 온실가스 배출계수로 CO_2에 대해 1로 가정된 지구온난화지수를 포함한다.

Tier 2방법을 활용한 온실가스 산정방법은 Tier 1 산정식의 배출계수를 국가고유의 배출계수로 대체하여 산정한다. 국가고유의 배출계수는 IPCC에서 제공하는 기본 배출계수와 같거나 혹은 차이가 있을 수도 있으나, 이는 자국의 실정에 따라 보다 잘 적용되므로 Tier1의 산정보다 정확하게 산정하게 된다.

Tier1과 Tier2의 온실가스 산정방법은 연료 조합(fuel combination)에 대한 평균적인 배출계수를 이용하여 산정하는 반면 Tier3의 산정방법은 연료의 종류, 연소 기술, 작동 조건, 통제 기술, 유지관리의 방법, 장비의 연식 등 Eq. (3)과 같이 매우 상세한 자료를 필요로 한다.

$$E_{GHG,\ fuel,\ technology}(\text{kg GHG}) = F{\cdot}C_{fuel,\ technology}(\text{TJ}){\cdot}\ E{\cdot}F_{GHG,\ fuel,\ technology}(\text{kg GHG/TJ}) \quad (3)$$

여기서 $E_{GHG,\ fuel,\ technology}$은 연료의 유형 및 기술에 의한 온실가스의 배출량이며, $F{\cdot}C_{fuel,\ technology}$은 기술의 유형에 의해 연소되는 연료의 양, $E{\cdot}F_{GHG,\ fuel,\ technology}$는 연료의 유형 및 기술에 의한 온실가스의 배출계수이다.

3. 온실가스 배출영향요인

3.1 생애주기의 분류

건설공사의 생애주기는 일반적으로 기획 및 설계단계, 시공단계, 운영단계, 해체 및 재활용 단계로 구분되며(MOLIT 2010) 각 단계의 업무특성에 따라 온실가스를 배출하게 된다. 따라서 건설공사의 전생애주기에 걸쳐 배출되는 온실가스를 일괄적으로 산정하는 것은 한계가 있으며, 건설공사의 생애주기 단계별 수행되는 업무특성에 따라 각각의 배출요인을 분석할 필요가 있다(Chun et al., 2009).

기획 및 설계단계는 실질적인 공사는 이루어지지 않으며 사업계획수립부터 설계 도서를 완성하기까지의 단계이다. 시공단계는 실질적인 공사가 이루어지는 단계로 구매, 운송, 현장시공단계로 구분한다. 그리고 운영단계는 시설물 준공 이후 해체까지 시설물을 사용하고 유지를 위한 개보수를 진행하는 단계이며, 해체 및 재활용 단계는 시설물을 해체하고 자재들을 폐기하거나 재활용하는 단계로 분류하였다. 따라서 기존 연구(Chun et al., 2009; Hong et al., 2011; Bae and Park, 2012; Jeong, 2009; Truitt 2009)를 기반으로 아래와 같이 단계별 온실가스 배출영향요인을 도출하였다.

3.2 단계별 온실가스 배출영향요인

3.2.1 기획 및 설계단계

기획 및 설계단계에서는 앞서 언급한 바와 같이 실질적인 공사는 이루어지지 않는 부분으로 프로젝트 참여인력의 제반활동에 의해 온실가스가 발생된다. 이 단계의 온실가스 배출은 실질적인 설계를 위한 사무활동과 이러한 사무활동을 지원하는 지원활동에 의한 배출로 구분할 수 있다. 먼저, 사무활동에 의한 배출은 사무공간의 전력, 상수도, 유류 등 에너지 사용이 가장 큰 영향요인이다. 그리고 지원활동에 의한 배출은 현장답사 등의 외부활동과 참여인력의 통근 등 교통수단에 의해 발생되는 배출을 요인으로 한다.

3.2.2 시공단계

시공단계는 구매단계, 운송단계, 현장시공단계로 세분될 수 있다. 구매단계는 설계가 이루어진 후 시설물의 투입자재를 조달하는 단계이다. 건설자재는 원료의 채취에서부터 분쇄, 가공, 화학공정 등의 가공단계를 거치면서 온실가스를 배출하게 된다. 따라서 본 연구는 구매단계를 프로젝트에 필요한 건설자재가 생산되는 단계로 간주하고 투입자재 생산에 의해 발생되는 온실가스 배출을 구매단계의 배출요인으로 한다.

운송단계는 자재 등 프로젝트의 필요요소를 출하지에서 건설현장 또는 저장소까지 운반하는 단계이다. 또한 공사기간 동안 프로젝트를 위해 투입되는 인력과 장비의 운송도 포함되어야한다. 따라서 운송단계의 배출요인은 자재, 장비, 인력 운송 시 발생되는 온실가스 배출을 배출요인으로 한다.

현장시공단계에서는 건설장비 사용에 의해 발생되는 온실가스 배출이 가장 큰 영향요인이다. 또한, 현장사무실에서 소비되는 전력, 상수도, 도시가스 등 에너지 사용과 현장사무인력의 출퇴근, 업무용 차량의 사용 등 관리활동에 의해 발생되는 온실가스 배출이 이 단계의 배출요인이다.

3.2.3 운영단계

운영단계는 시설물의 종류와 형태에 따라 달라질 수 있으나, 크게 시설물의 운영과 사용에 의한 온실가스 배출로 구분할 수 있다. 먼저, 운영에 의한 배출은 시설물 자체의 사용을 위한 전력, 유류, 상수도, 가스 등의 에너지, 개·보수 시 소요되는 자재 및 장비 등에 발생되는 온실가스 배출을 요인으로 볼 수 있다. 그리고 사용에 의한 온실가스 배출은 시설물을 사용하는 이용자에 의해 온실가스가 발생되는 부분으로 예를 들어, 도로의 경우 차량, 철도의 경우 기차의 운행에 의해 발생되는 온실가스 배출을 배출요인으로 볼 수 있다.

3.2.4 해체 및 재활용단계

해체시의 온실가스 배출요인은 시설물 해체 시 투입되는 자재, 장비사용에 의한 배출이다. 재활용시의 배출요인은 폐기되는 자재에 의해 발생되는 온실가스이며 재활용되는 자재도 배출요인으로 포함시켜 실제 온실가스 산정 시 증가요인으로 포함시킬 필요가 있다.

4. 온실가스 모니터링 시스템

4.1 시스템 개요 및 구성

본 연구에서 제시하는 온실가스 모니터링 시스템은 단계별 모니터링과 일정별 모니터링을 구분하여 제공한다. 단계별 모니터링은 건설 사업단계 중 시공단계에서 발생되는 온실가스에 대해 설계단

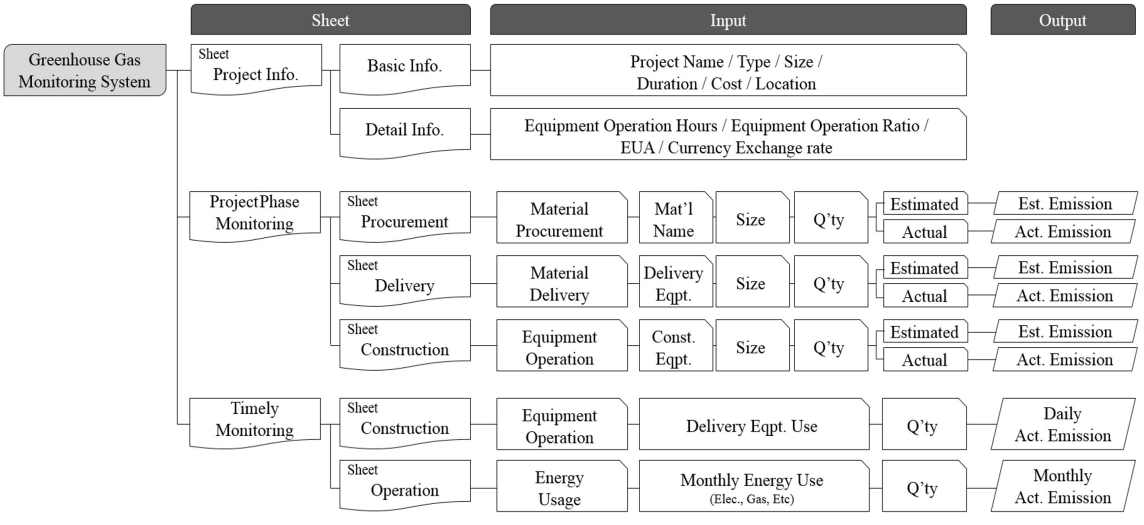


Fig. 2. Greenhouse Gas Emission Monitoring System Framework

계에서 배출전망치를 산정하고 시공단계에서 실제 배출치를 산정해 이를 비교·평가할 수 있도록 하였다. 또한, 일정별 모니터링은 공사의 착공 시점을 기준으로 시공단계의 온실가스 배출량은 일(day)단위, 운영단계에서의 온실가스 배출량은 월(month)단위로 산정하여 제공되도록 하였다.

온실가스 배출량의 산정은 앞서 제시한 환경영향요인에 대해 IPCC 가이드라인의 산정식을 토대로 분석단계별 특성에 맞도록 구축하였으며, '국가 LCI 데이터베이스 정보망'에서 제공하는 국가 온실가스 배출계수를 활용하였다. 온실가스 배출량 산정 시 고려되는 온실 가스는 기후변화협약에서 온실가스로 규정하고 있는 CO_2, CH_4, N_2O, HFCs, PFCs, SF_6 등 6종의 온실가스 중 탈루배출이 있는 경우 고려되는 HFCs, PFCs, SF_6은 산정대상에서 제외하였다. 그리고 온실가스 배출량 산정 시 Non-CO_2 온실가스인 CH_4, N_2O는 앞서 제시한 GWP를 적용하여 CO_2-e로 환산하였다.

4.2 단계별 온실가스 모니터링

4.2.1 단계별 온실가스 산정방법

단계별 모니터링은 Fig. 3과 같이 건설 사업단계 중 시공단계에서 발생되는 온실가스에 대해 설계단계에서 배출전망치를 산정하고 시공단계에서 실제 배출치를 산정해 이를 비교·평가할 수 있도록 한다. 이는 설계단계에서 배출전망치 산정을 통해 친환경

설계를 위한 의사결정을 지원하고 시공단계에서 실제 배출치 산정을 통해 배출전망치와 비교·평가함으로써 녹색건설현장 구현과 성과평가의 활용을 위함이다.

단계별 온실가스 모니터링은 구매, 운송, 현장시공단계로 구분된 시공단계를 대상으로 한다. 먼저, 구매단계의 배출량 산정은 3단계를 거쳐 총 배출량을 산정하게 된다. 각 공종별로 투입된 각 자재의 온실가스 배출량은 Eq. (4)와 같이 되며, Eq. (5)에 의해 공종별로 합산된다. 공종별로 합산된 온실가스 배출량은 다시 Eq. (6)에 의해 구매단계의 총 온실가스 배출량으로 산정된다.

$$E_{Mi}\,(\mathrm{tCO_2}) = I_{Mi}\,(\mathrm{unit}) \times EF_{Mi}\,(\mathrm{tCO_2/unit}) \tag{4}$$

$$E_{WCj}\,(\mathrm{tCO_2}) = \Sigma\ E_{Mi}\,(\mathrm{tCO_2}) \tag{5}$$

$$E_{PP}\,(\mathrm{tCO_2}) = \Sigma\ E_{WCj}\,(\mathrm{tCO_2}) \tag{6}$$

여기서 E_{Mi}은 자재별 온실가스 배출량, I_{Mi}은 자재별 투입물량, EF_{Mi} 는 자재별 온실가스 배출계수이며, E_{WCj}는 공종별 온실가스 배출량, E_{PP}는 구매단계의 총 온실가스 배출량이다. 투입되는 자재의 단위는 kg, m, m^2, m^3 등으로 자재의 종류마다 다르게 적용되므로 위의 식은 unit으로 표현하였다.

운송단계의 온실가스 배출량은 먼저 자재운반을 위해 투입된 운송장비별로 Eq. (7)과 같이 산정한다. 산정된 운송장비별 온실가스 배출량은 Eq. (8)과 같이 공종별로 합산하며, 공종별 온실가스 배출량의 총합으로 Eq. (9)와 같이 운송단계의 총 온실가스 배출량을 산정한다.

GHG Monitoring System

Add Classification | Removal Classification | Add Equipment | Removal Equipment

Project	Classification	Equipment	Specification	Design	Actual	GHG Emission Factor(tCO_2/hr)				Design Emission(tCO_2)	Actual Emission(tCO_2)	Low Emission(tCO_2)	Low Cost(won)
						CO_2	CH_4	N_2O	Total				
A Highway										113.96	99.34	14.63	146,252
	Civil1									61.85	56.07	5.78	57,798
		Loader - Tire	1.34m3	49	45	2.00.E-02	2.02.E-05	4.82.E-05	2.01.E-02	7.87	7.22	0.64	6,422
		Excavator - Tire	0.8m3	49	45	4.23.E-02	4.28.E-05	1.02.E-04	4.24.E-02	16.64	15.28	1.36	13,582
		Vibration Roller	4.4ton	49	41	8.31.E-03	8.41.E-06	2.00.E-05	8.34.E-03	3.27	2.73	0.53	5,337
		Tire Roller	8~15ton	49	45	2.08.E-02	2.10.E-05	5.01.E-05	2.09.E-02	8.18	7.51	0.67	6,679
		Dump Truck	15ton	18	17	4.13.E-02	4.18.E-05	9.96.E-05	4.14.E-02	5.97	5.64	0.33	3,315
		Water Tank	5,500L	18	17	2.41.E-02	2.44.E-05	5.82.E-05	2.42.E-02	3.48	3.29	0.19	1,935
		Vibration Roller(self-propel)	2.5ton	18	19	5.97.E-03	6.04.E-06	1.44.E-05	5.99.E-03	0.86	0.91	0.05	479
		Tire Roller(self-propel)	8~15ton	18	17	2.08.E-02	2.10.E-05	5.01.E-05	2.09.E-02	3.01	2.84	0.17	1,670
		Asphalt Sprayer	300L	6	7	1.70.E-03	1.84.E-06	4.39.E-06	1.71.E-03	0.08	0.10	0.01	136
		Tire Roller(self-propel)	8~15ton	12	10	2.08.E-02	2.10.E-05	5.01.E-05	2.09.E-02	2.00	1.67	0.33	3,339
		Bulldozer - Caterpillar	12ton	13	11	3.79.E-02	3.84.E-05	9.14.E-05	3.80.E-02	3.96	3.35	0.61	6,085
		Bulldozer	13ton	13	11	3.79.E-02	3.84.E-05	9.14.E-05	3.80.E-02	3.96	3.35	0.61	6,085
		Excavator - Caterpillar	0.4m3	13	11	2.47.E-02	2.50.E-05	5.95.E-05	2.48.E-02	2.58	2.18	0.40	3,966
	Civil2									31.33	27.25	4.08	40,771
		Loader - Tire	0.95m3	20	22	1.61.E-02	1.63.E-05	3.88.E-05	1.62.E-02	2.58	2.84	0.26	2,585
		Excavator - Tire	0.6m3	21	11	3.01.E-02	3.05.E-05	7.26.E-05	3.02.E-02	5.07	2.66	2.42	24,162
		Excavator - Caterpillar	1.2m3	15	12	5.24.E-02	5.31.E-05	1.27.E-04	5.26.E-02	6.31	5.05	1.26	12,619
		Concrete Mixer	6m3	10	9	3.37.E-02	3.41.E-05	8.14.E-05	3.38.E-02	2.71	2.43	0.27	2,705
		Vibration Roller	6ton	25	24	3.01.E-02	3.05.E-05	7.26.E-05	3.02.E-02	6.04	5.80	0.24	2,416
		Tire Roller	8~15ton	20	22	2.08.E-02	2.10.E-05	5.01.E-05	2.09.E-02	3.34	3.67	0.33	3,339
		Dump Truck	24ton	11	10	5.97.E-02	6.04.E-05	1.44.E-04	5.99.E-02	5.27	4.79	0.48	4,792
	Civil3									20.79	16.02	4.77	47,683
		Vibration Roller(self-propel)	6ton	5	6	3.01.E-02	3.05.E-05	7.26.E-05	3.02.E-02	1.21	1.45	0.24	2,416
		Tire Roller(self-propel)	8~15ton	6	7	2.08.E-02	2.10.E-05	5.01.E-05	2.09.E-02	1.00	1.17	0.17	1,670
		Asphalt Sprayer	300L	15	14	1.70.E-03	1.84.E-06	4.39.E-06	1.71.E-03	0.20	0.19	0.01	136
		Tire Roller(self-propel)	8~15ton	32	29	2.08.E-02	2.10.E-05	5.01.E-05	2.09.E-02	5.34	4.84	0.50	5,009
		Bulldozer - Caterpillar	10ton	10	7	3.24.E-02	3.28.E-05	7.83.E-05	3.25.E-02	2.60	1.82	0.78	7,803
		Bulldozer	13ton	20	11	3.79.E-02	3.84.E-05	9.14.E-05	3.80.E-02	6.08	3.35	2.74	27,381
		Excavator - Caterpillar	0.7m3	19	14	2.85.E-02	2.89.E-05	6.89.E-05	2.86.E-02	4.35	3.20	1.14	11,439

Fig. 3. Greenhouse Gas Emission Monitoring by Phase

$$E_{Vi}(tCO_2) = D_i(km) \times M_i\,(ton) \times EF_{Vi}\,(tCO_2/km \cdot ton) \quad (7)$$

$$E_{WCj}\,(tCO_2) = \Sigma\ E_{Vi}\,(tCO_2) \quad (8)$$

$$E_{TP}(tCO_2) = \Sigma\ E_{WCj}\,(tCO_2) \quad (9)$$

여기서 E_{Vi}는 운송장비별 온실가스 배출량, D_i는 자재의 운송거리, M_i는 운송자재의 적재량, EF_{Vi}는 운송장비별 온실가스 배출계수이며, E_{WCj}는 공종별 온실가스 배출량, E_{TP}는 운송단계 총 온실가스 배출량이다.

현장시공단계의 온실가스 배출량은 구매단계, 운송단계와 마찬가지로 3단계를 거쳐 총 배출량을 산정하게 되며, 먼저 각 공종에 투입된 장비별 온실가스 배출량 산정은 Eq. (10)과 같이 산정한다. 산정된 투입장비별 온실가스 배출량은 Eq. (11)과 같이 공종별 온실가스 배출량을 산정하며, 공종별 온실가스 배출량의 총합으로 Eq. (12)와 같이 현장시공단계의 총 온실가스 배출량을 산정한다.

$$E_{Ei}\,(tCO_2) = I_{Ei}\,(Unit) \times OT_{Ei}(hr) \times EF_{Ei}\,(tCO_2/hr) \quad (10)$$

$$E_{WCj}\,(tCO_2) = \Sigma\ E_{Ei}\,(tCO_2) \quad (11)$$

$$E_{CP}\,(tCO_2) = \Sigma\ E_{WCj}\,(tCO_2) \quad (12)$$

여기서 E_{Ei}는 건설장비별 온실가스 배출량, I_{Ei}는 장비별 투입대수, OT_{Ei}는 장비의 가동시간, EF_{Ei}는 건설장비별 온실가스 배출계수이며, E_{WCj}는 공종별 온실가스 배출량, E_{CP}는 현장시공단계 총 온실가스 배출량이다.

4.2.2 단계별 온실가스 모니터링

사업단계별 모니터링 시트는 구매단계, 운송단계, 현장시공단계 시트로 구분하여 구성하였다. 사업단계별 모니터링을 위한 데이터의 입력은 먼저 프로젝트명, 공종명을 통해 온실가스 산정의 범위를 지정하며 분석공종과 자재 또는 운송장비, 건설장비의 추가 및 삭제는 시스템 화면 우측상단의 공종 또는 자재 등의 추가와 삭제버튼으로 할 수 있다.

그 다음으로 분석단계, 자재명 또는 운송장비명, 건설장비명과 규격을 입력하면 해당 자재 또는 운송장비, 건설장비의 단위와 온실가스 배출계수가 자동으로 지정된다. 이를 통해 설계투입량의 입력으로 배출전망치가 산정되고 실제투입량의 입력으로 실제배출량이 자동으로 산정되도록 하였다.

또한, 배출전망치와 실제배출치의 배출량 차이를 경제 가치로 나타내기 위해 탄소거래제의 탄소거래가격을 적용하여 경제적 가치로 계산하여 나타내도록 하였다.

4.3 일정별 온실가스 모니터링

4.3.1 일정별 온실가스 산정방법

일정별 온실가스 모니터링은 착공 후 투입되는 장비에 의한 온실가스 배출을 일(day)단위로 산정하고, 이 후 운영단계에서의 온실가스 배출을 월(month)단위로 산정하여 시공 시 녹색건설현장 구현과 친환경 시설물로 유지시키기 위함이다.

일정별 온실가스 모니터링을 위해 투입되는 장비별 온실가스 배출량 산정은 위의 Eq. (12)와 같은 산정식을 사용하며, 산정된 일별 투입장비의 온실가스 배출량의 합으로 Eq. (13)과 같이 일별 총 온실가스 배출량을 산정한다.

$$E_D\,(tCO_2) = \Sigma\ E_{Ei}\,(tCO_2) \quad (13)$$

여기서 E_D는 시공단계 일정별 온실가스 배출량이고, E_{Ei}는 건설장비별 온실가스 배출량이다.

운영단계의 온실가스 배출량은 일정별 모니터링을 위해 산정하며, 사용되는 전력, 상수도, 유류에 의한 온실가스 배출량을 각각 산정한다. 먼저, 전력과 상수도의 사용에 따른 온실가스 배출량 산정은 각 에너지사용량에 각각의 탄소배출계수의 곱으로 산정하며 Eqs. (14) and (15)와 같다.

$$E_{EPi}\,(tCO_2) = EP\,(kWh) \times EF_{EP}\,(tCO_2/kWh) \quad (14)$$

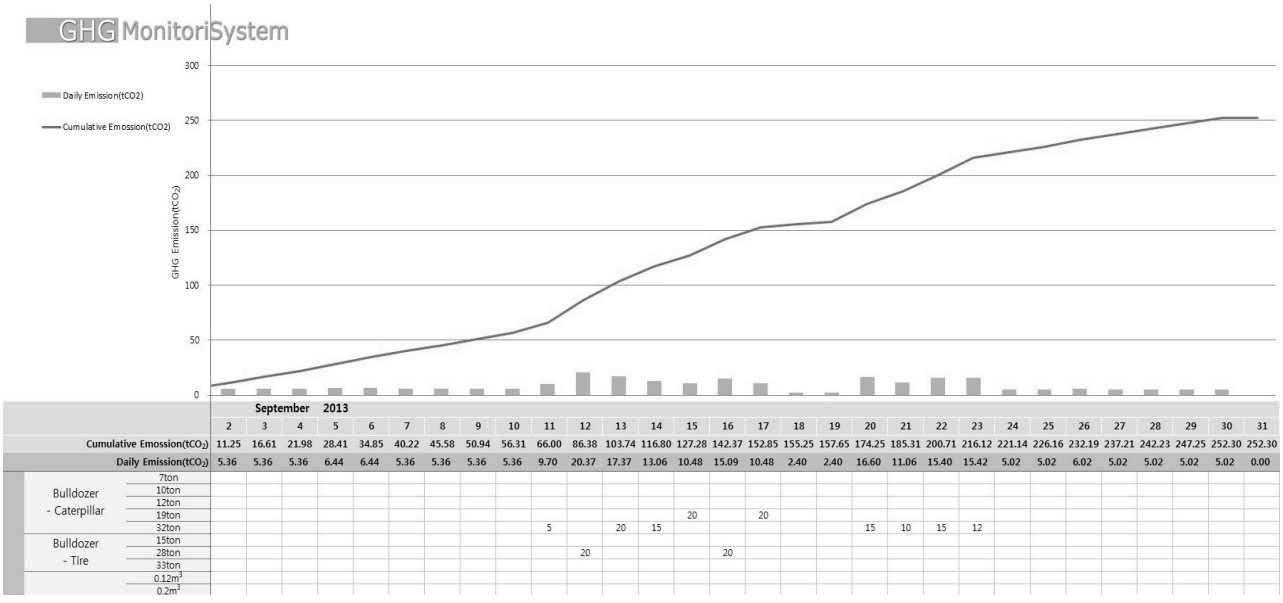
$$E_{WW}\,(tCO_2) = WW(ton) \times EF_{WW}\,(tCO_2/ton) \quad (15)$$

여기서 E_{EPi}는 구매전력의 온실가스 배출량, E_P는 구매전력량, EF_{EP}는 구매전력의 온실가스 배출계수이며, E_{WW}는 상수도의 총 온실가스 배출량, WW는 상수도 사용량, EF_{WW}는 상수도의 온실가스 배출계수이다.

위의 구매전력, 상수도 사용에 의한 온실가스 배출량 산정과는 달리 유류사용에 의한 온실가스 배출량 산정은 기본적인 연료사용량과 연료의 온실가스 배출계수에 순발열량과 산화율 등을 곱하여 산정하며 Eq. (16)와 같다.

$$E_{oil}\,(tCO_2) = Oil(\ell) \times EF_{oil}\,(tCO_2/\ell) \times \text{순발열량(kcal/unit)} \times \text{온실가스배출계수(tC/kcal)} \times \text{산화율} \times 44/12(tCO_2/tC) \quad (16)$$

여기서 E_{oil}는 유류의 총 온실가스 배출량, Oil은 유류 사용량, EF_{oil}는 유류의 온실가스 배출계수이다. 위의 산정식으로 산정된



		September 2013																												
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Cumulative Emossion(tCO_2)		11.25	16.61	21.98	28.41	34.85	40.22	45.58	50.94	56.31	66.00	86.38	103.74	116.80	127.28	142.37	152.85	155.25	157.65	174.25	185.31	200.71	216.12	221.14	226.16	232.19	237.21	242.23	247.25	252.30	252.30
Daily Emission(tCO_2)		5.36	5.36	5.36	6.44	6.44	5.36	5.36	5.36	5.36	9.70	20.37	17.37	13.06	10.48	15.09	10.48	2.40	2.40	16.60	11.06	15.40	15.42	5.02	5.02	6.02	5.02	5.02	5.02	5.02	0.00
Bulldozer - Caterpillar	7ton																														
	10ton																														
	12ton																														
	19ton														20		20														
	32ton										5		20	15						15	10	15	12								
Bulldozer - Tire	15ton																														
	28ton											20				20															
	33ton																														
	$0.12m^3$																														
	$0.2m^3$																														

Fig. 4. Greenhouse Gas Emission Monitoring by Days

에너지별 온실가스 배출량은 각 에너지의 월별 사용량을 기준으로 합하여 월단위로 산정한다.

4.3.2 일정별 온실가스 모니터링

일정별 모니터링 시트는 시공단계와 운영단계 시트로 구분하여 구성하였다. 먼저, 시공단계의 일정별 모니터링은 일단위로 앞서 프로젝트개요시트에서 입력한 공사기간과 연계되어 공사의 착공일부터 입력되도록 설정하였다. 입력데이터는 73종의 건설 장비를 해당일자에 투입대수를 입력하면 장비사용에 의한 일 배출량이 자동으로 산정되어 Fig. 4와 같이 그래프에 바(bar)형태로 표시된다. 또한 공사가 진행되는 일정에 따라 해당일자의 온실가스 배출량과 공사기간동안의 누적 배출량이 자동으로 계산되어 그래프에 선(line)형태로 나타나도록 하였다. 그리고, 운영단계의 일정별 모니터링은 시공단계의 일정별 모니터링 구성과 동일하나 운영단계에서 분석하는 요인의 데이터 수집 특성을 고려하여 월단위의 온실가스 배출량을 모니터링 할 수 있도록 하였다.

5. 결 론

본 연구는 건설 사업에 의해 발생되는 온실가스의 산정과 효율적인 관리를 위해 전생애주기적 관점의 온실가스 모니터링 시스템을 개발에 목적을 두었다. 이에 본 연구는 건설 활동에 의해 발생되는 온실가스를 단계별, 일정별로 모니터링 할 수 있는 시스템을 개발하였으며, 사업 전 예상되는 배출전망치와 사업 후의 실제배출치의 산정을 통해 이를 비교·평가 할 수 있다. 또한, 건설사업의 생애주기인 기획 및 설계, 시공, 운영, 해체 및 재활용단계에서 세분화된 온실가스 배출요인을 분석하여 도출하였다. 그리고 도출된 건설사업 단계별 배출요인에 대해 각각의 온실가스 배출량 산정방법을 구축하였다. 특히, 기존 시스템에서 적용한 연료량을 기준으로 연소에 의해서 발생되는 온실가스량을 산정하였다. 그러나 본 시스템은 장비별로 특화된 온실가스 배출계수를 사용함으로써 장비의 온실가스 배출특성에 맞는 정확한 측정이 가능하도록 하였다.

그러나 우리나라에 구축된 온실가스 배출계수 데이터의 양이 매우 부족한 실정으로 분석범위에 포함된 사업 단계에서의 배출량 분석도 제한적으로 이루어진 부분이 있다. 따라서 추후 연구는 건설사업 단계별 배출요인에 따라 발생되는 온실가스 배출량 산정을 위한 데이터 구축 방안을 구체적으로 명확히 하여야 하며, 아직 미구축된 우리나라 고유의 온실가스 배출계수 데이터의 구축이 필요하다.

본 연구를 통해 설계단계에서 배출전망치 산정을 통한 친환경 설계 의사결정과 시공 및 운영단계에서 실제 배출치 산정을 통한 녹색건설현장의 구현, 그리고 배출전망치와 실제 배출치간의 비교·평가를 통한 녹색건설 성과평가 지원도구로 활용이 기대된다. 또한, PMIS (Project Management Information System)와의 연계를 통한 프로젝트의 온실가스 배출량 정보의 구축과 공유, 설계의 경제성 검토단계에서 이루어지는 LCA분석의 도구로 활용될 것으로 기대된다. 이를 위해서는 본 연구를 통해 개발된 시스템을 활용한 파일럿 데이터 수집 및 활용에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2010-0025051).

References

Bae, J. H. and Park, H. S. (2012). "Development of causal map for greenhouse gas emission in construction." *Journal of 2012 KoCon Spring Comprehensive Academy Conference*, The Korea Contents Association, Vol. 10, No. 1, pp. 109-110 (in Korean).

Chun, M. H., Park, M. S., Lee, H. S. and Shin, J. H. (2009). "Analysis of greenhouse gas (GHG) emission factors during the construction phase." *Journal of 2009 KICEM Academy Conference*, Korea Institute of Construction Engineering and Management, Vol. 9, pp. 260-265.

Hong, T. H., Jang, M. H. and Ji, C. Y. (2011). "An analysis on consideration factors for assessing CO_2 emission in construction phase." *Journal of 2011 KICEM Academy Conference*, Korea Institute of Construction Engineering and Management, Vol. 11, pp. 405-406 (in Korean).

International Energy Agency (2009). *CO_2 emission from fuel combustion 2009 end*, Report, IEA, France.

IPCC (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories (S. Eggelston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe eds)*, Report, Japan.

Jeong, Y. S. (2009). *A study on prediction model of carbon dioxide emission in life cycle for residential buildings*, Master's Thesis, Graduate school of University of Seoul (in Korean).

Kim, J. Y., Lee, S. E. and Sohn, J. Y. (2004). "An estimation of the energy consumption & CO_2 emission intensity during building construction." *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 20, No. 10, pp. 319-326 (in Korean).

Kim, K. T. and Lee, D. H. (2010). "Development of a method to measure the level of green construction technology." *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 10, No. 2, pp. 179-182 (in Korean).

Kim, T. H. (2007). "Estimation of emissions of carbon dioxide (CO_2) in the metropolitan area and the necessity of developing the learning materials for its eduction." Graduate school of Korea National University of Education (in Korean).

Kim, T. Y. (2013). *Development of greenhouse gas monitoring system for construction industry*, Master's Thesis, Graduate school of Hanbat National University (in Korean).

Kwon, S. H. (2009). *The integrated cost analysis in the environmental and economic feasibility of the environmental facilities -For the projects of drainage systems as environmental facilities-*, Graduate school of Chung-ang University (in Korean).

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2010). "Guidelines for calculating carbon emissions of each facilities." Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

Peter Truitt (2009). *Potential for reducing greenhouse gas emissions in the construction sector*, Report, United States Environmental Protection Agency, USA.

Song, S. H., Jun, M. H. and Sohn, J. R. (2011). "Identification of environmental management factors through assessing environmental impact by building construction." *Journal of the Architectural Institute of Korea Academy Conference*, Vol. 31, No. 1, pp. 203-204 (in Korean).

Stern, L. (2006). *Stern review on the economics of climate change*, Report, Cambridge University Press, United Kingdom.