

도로교통부문에서 주행거리를 이용한 CO₂ 배출량 및 불확도 산정에 관한 연구: 승용차 중심으로

박웅원¹ · 박천건^{2*} · 김응철³

¹ 교통안전공단 안전연구처, ² 경기대학교 수학과, ³ 인천대학교 도시환경공학부

A Study on Estimation of CO₂ Emission and Uncertainty in the Road Transportation Sector Using Distance Traveled : Focused on Passenger Cars

PARK, Woong Won¹ · PARK, Chun Gun^{2*} · KIM, Eungcheol³

¹ Safety Research Office, Korea Transportation Safety Authority, Gyeongbuk 740-220, Korea

² Department of Mathematics, Kyonggi University, Gyeonggi 443-760, Korea

³ Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, Incheon 406-772, Korea

Abstract

Since Greenhouse Gas Inventory & Research Center (GIR) of Korea was founded in 2010, the annual greenhouse gas inventory reports, one of the collections of GIR's major affairs, have been published from 2012. In the reports many items related to greenhouse gas emission quantities are included, but among them uncertainty values are replaced to basic values which IPCC guideline suggests. Even though IPCC guideline suggests the equations of each Tier level in details, the guideline recommends developing nation's own methodology on uncertainty which is closely related to statistical problems such as the estimation of a probability density function or Monte carlo methods. In the road transportation sector the emissions have been calculated by Tier 1 but the uncertainties have not been reported. This study introduce a bootstrap technique and Monte carlo method to estimates annual emission quantity and uncertainty, given activity data and emission factors such as annual traveled distances, fuel efficiencies and emission coefficients.

국가 온실가스를 산정, 보고, 검정을 관장하는 온실가스종합정보센터가 2010년에 출범된 후, 주요 업무의 집합체인 국가 온실가스 인벤토리 보고서가 2012년부터 해마다 발간되었다. 보고서에는 부문별 온실가스 배출량 및 불확도가 보고되고 있지만, 대부분의 부문에서 불확도의 기입은 단순히 IPCC 가이드라인의 기본값으로 대체되고 있는 실정이다. IPCC 가이드라인은 부문별 온실가스 배출량을 산정함에 있어 Tier 수준에 따른 구체적인 산정식을 제시하고 있지만, 불확도의 경우 확률밀도함수 추정 또는 몬테카를로 방법 등을 적용한 국가고유 방법론의 개발을 권고하고 있다. 도로교통부문도 배출량이 Tier 1 수준으로 산정되고 있지만 불확도는 보고되지 못하고 있는 실정이다. 본 연구는 도로교통부문에서 일반자가용자동차형을 대상으로 활동자료인 연간 주행거리, 연비 그리고 배출계수를 이용하여 연간 배출량을 산정하는데 국한하지 않고 불확도 산정에 적용되는 여러 통계적 기법 중에 한 가지인 붓스트랩 및 몬테카를로 방법을 소개하는데 있다.

Keywords

bootstrap, distance traveled, fuel efficiency, monte carlo, uncertainty

붓스트랩, 주행거리, 연비, 몬테카를로, 불확도

* : Corresponding Author
cgpark@kgu.ac.kr, Phone: +82-31-249-9659, Fax: +82-31-253-1165

Received 3 September 2014, Accepted 6 November 2014

서론

1. 연구의 배경 및 목적

지속적으로 국가 온실가스에 대한 관심이 증대되고 있는데 반해 저탄소 녹색성장 정책의 효율적 추진을 위한 부문별 CO₂ 배출현황의 정확한 파악 및 저감 목표 설정에 대한 신뢰성 확보가 상당히 미진한 실정이다.

최근 온실가스종합정보센터에서 2012년부터 발간되어 온실가스 인벤토리 보고서는 온실가스를 배출하는 대부분의 부문을 대상으로 배출량 및 불확도를 수집하여 연간으로 출판되고 있다. 특히 도로교통부문도 에너지 부문의 수송에 배정되어 1990년부터 2011년까지 활동자료인 연료소비량 기준으로 Tier 1 수준 배출량이 산정되고 있지만 불확도가 산정되지 않은 채 보고되고 있다(GIR, 2014). 아울러 활동자료로서 국가에너지통계인 에너지통계연보 및 석유류수급통계에서 제공되는 연료소비량은 차종 및 용도의 구분이 없어서 해당 분류에 따른 배출량도 산정할 수 없는 실정이다. 하지만 교통안전공단에서 매년 제공되는 주행거리는 차종 및 용도의 구별이 가능하고 배출량 산정도 용이할 것으로 보인다.

따라서 본 연구는 교통부문에서 국내외적으로 적용되고 있는 CO₂ 배출량 방법론을 검토하고, 특정 차량의 범주를 설정하여 교통안전공단과 에너지경제연구원에서 제공하는 활동자료인 주행거리, 연비 그리고 기타 배출계수를 이용하여 배출량뿐만 아니라 불확도를 산정할 수 있는 붓스트랩 및 몬테카를로 방법을 소개하고자 한다. 또한 교통부문에서 온실가스 배출량의 신뢰성을 확보하기 위한 제언으로 필요한 활동자료를 제안하였다.

2. 연구의 범위 및 방법

도로교통부문의 배출량 및 불확도 산정을 위해 적용된 자동차는 2013년 기준으로 휘발유를 사용하는 일반 자가용자동차대형(2000cc이상)이다. 활동자료는 교통안전공단에서 연간으로 제공되는 주행거리, 에너지경제연구원에서 3년 주기로 수행되는 에너지총조사(2011 Energy Consumption Survey, 2013)로부터 발표된 해당 차종에 대한 연비이다. 또한 배출계수는 에너지경

제연구원에서 발표된 휘발유의 순발열량(7,780kcal/ℓ)이 적용되었다(에너지통계연보, 2013). 여기서 주행거리는 전수조사가 아닌 표본으로부터 얻어진 자료이며, 연비는 2011년 에너지총조사에서 발표된 단일 값(6.34km/ℓ)이고, 순발열량 및 CO₂ 배출계수도 단일 값이다.

지금까지 우리나라는 해당 차량의 온실가스 배출량이 활동자료인 연료소비량과 배출계수의 곱으로 얻어졌지만 활동자료(또는 배출계수)의 불확도가 보고되지는 않았다.

따라서 본 연구는 배출량뿐만 아니라 불확도를 산정할 수 있는 붓스트랩 및 몬테카를로 방법을 소개하였으며 교통안전공단에서 제공된 주행거리와 온실가스 배출량 산정에 필요한 연비 및 배출계수를 바탕으로 기존방법을 적용하고 문제점을 분석 및 정리하였다.

마지막으로 온실가스 배출량 및 불확도 산정에 적용된 제안된 방법의 정확성을 높이기 위한 활동자료 및 배출계수의 객관적인 자료 제공 및 수정에 관한 개선방안을 도출하였다.

선행연구 검토

1. CO₂ 온실가스 배출량 산정식

국내외적으로 도로교통부문에서 온실가스 배출량 산정은 IPCC¹⁾ 가이드라인(2006)에서 제공하는 방법과 일부 국가의 활동자료 및 배출계수의 개발 환경에 맞추어 방법론이 마련 되어왔다.

IPCC 가이드라인에서는 Tier 수준에 따른 세 개의 산정식이 다음과 같이 제시하였다. Tier 1 방법은 국가적 관점으로 연료별 소비량과 배출계수를 적용한 것으로 다소 정확성이 부족할 수 있다.

$$E = \sum_a \text{Fuel}_a \cdot EF_a \quad (2)$$

여기서 E(배출량, kg-CO₂, CH₄, N₂O), Fuel(연료 소비량, ℓ), EF(배출계수, kg/TJ), a는 연료 종류(가솔린, 디젤, 천연가스, LPG 등)이다.

Tier 2 방법은 식(1)의 Tier 1방법과 동일한 산정식이지만, 연료별, 차종별, 배출제어기술별 연료소비량을

1) IPCC(Intergovernment Panel on Climate Change) : 1988년 기후변화 문제에 대처하기 위해 세계기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)이 공동으로 설립한 단계로 기후변화에 관련된 과학적, 기술적 사실에 대한 평가를 제공

고려하여 산정된 것이다. 국내의 경우 이러한 자료는 지식경제부가 3년 주기로 에너지총조사를 수행하여 육상 운수업의 자가용 차량의 연료소비량 자료를 수집하지만, 조사 기간의 연도를 대체할 수 있는 통계적 연구가 전무한 상태이다.

Tier 3 방법은 앞에서 언급한 활동자료(연료소비량)가 존재하지 않으면, 주행거리 자료 및 속도 배출계수를 이용한 산정식이다.

$$E_{a,b,c,d} = \sum_{a,b,c,d} (VMT_{a,b,c,d} \cdot EF_{a,b,c,d}) + \sum_{a,b,c,d} C_{a,b,c,d} \quad (4)$$

여기서 E(배출량, kg-CO₂, CH₄, N₂O), VMT(주행거리, km), EF(배출계수, kg/km), 냉간시동(cold start) 배출량(C, kg-CO₂, CH₄, N₂O), 연료 종류(a), 차량 유형(b), 배출제어기술(c) 그리고 운행조건(d)이다. 아직 국내는 Tier 3 방법을 적용하기에는 기초 자료가 부족한 상태이다.

김태호 외(2010)는 국내외 온실가스 배출량 산정 방법을 국가별 확보된 자료와 Tier 수준별로 간략하게 정리하였다. 국외 온실가스 배출량은 자국의 자료를 IPCC가 제시한 방법론을 기초로 자국의 활동자료에 적합한 산정식으로 수정하여 사용되고 있다. 미국은 Tier 1 방법을 기초로 연료소비량이 주행거리와 연비를 통하여 계산되고 있고, 특히 고속도로 차량과 비고속도로 차량으로 구분하여 배출량을 산정한다.

유럽은 자국의 활동자료 및 배출계수의 수집에 따라서 IPCC 가이드라인이 제시한 Tier 수준에 맞추어 배출량이 산정되고 있으며, Table 1에 유럽국가에 대한 요약 표가 간단하게 제시하였다. 또한 Table 2에서 일부 국가들이 온실가스 산출하는데 적용된 방법과 자료수집의 현황을 제시하였다.

온실가스 배출량 산정에 중요한 활동자료인 속도 자료는 제시된 모든 국가가 수집되고 있지 않으며, 주행거

Table 1. Comparative european road sector greenhouse gas estimation

| Country | Level | Data collection | |
|------------|--------|-----------------|------------------|
| | | Activity data | Emission factor |
| Finland | Tier 2 | National DB | Its own national |
| Germany | Tier 1 | | emission factors |
| Ireland | Tier 1 | | |
| Netherland | Tier 1 | | |
| Sweden | Tier 1 | | |
| England | Tier 3 | | |

리는 한국, 미국, 영국, 일본 등 국가만이 보유하고 있는 실정이다.

배출계수는 모든 국가가 고유값으로 개발되고 있는 상태이다. 모의실험개발은 온실가스 배출량에 관한 불확도를 산정하는데 있어서 여러 방법 중 한가지의 도구로 적용할 수 있는데 미국, 핀란드, 네덜란드만이 개발하고 있다.

위에서 언급한 Tier 수준은 주어진 활동자료 및 배출계수를 이용하여 배출량을 산정할 수 있지만 불확도 산정을 제시하는 방법은 아니다. 그래서 IPCC 가이드라인에서는 불확도 산정을 위해서는 별도의 지침을 제시하였지만 각 국가가 보유하고 있는 온실가스 자료 및 정보에 의해서 국가고유의 방법을 개발하라고 권고하고 있다.

2. 불확도의 개요

온실가스 배출량 산정으로부터 얻어진 결과는 정확한 값이 아니며, 여러 요인에 의해 오차가 존재한다. 오차의 원인은 측정 오차, 표본 활동자료 및 배출계수, 그리고 파악되지 않은 원인을 들 수 있다. 그러므로 배출량 산정과 더불어 정확성에 대한 평가도 수행되어야 하는데 그것이 불확도 평가이다(IPCC, 2006; GPG, 2000).

IPCC 가이드라인 및 GPG 2000(2000)에서 불확도 원인 및 산정 방법이 제시되었지만, 배출량 산정만큼 구체적이지 못하다. 따라서 IPCC 가이드라인 및 GPG 2000에서는 불확도 산정을 위해 자국의 고유방법을 개발하도록 제시하고 있다.

활동자료 및 배출계수의 불확도 발생은 근본적으로 표본자료에 입각하여 수집되는데 기인한다. IPCC 가이드라인에서 배출량의 불확도 평가 방법으로 객관적인 불

Table 2. Greenhouse gas calculation method comparison

| Country | Level | M | Data collection | | | |
|------------|--------|---|-----------------|---|---|----|
| | | | D | V | T | EF |
| Korea | Tier 2 | x | △ | x | ○ | ○ |
| USA | Tier 3 | ○ | ○ | x | ○ | ○ |
| Finland | Tier 2 | ○ | x | x | ○ | ○ |
| Germany | Tier 1 | x | x | x | ○ | ○ |
| Ireland | Tier 1 | x | x | x | ○ | ○ |
| Netherland | Tier 1 | ○ | x | x | ○ | ○ |
| Sweden | Tier 1 | x | x | x | ○ | ○ |
| England | Tier 3 | x | ○ | x | ○ | ○ |
| Japan | Tier 3 | x | ○ | x | ○ | ○ |
| Australia | Tier 2 | x | x | x | ○ | ○ |

M(Monte carlo), D(Distance traveled), V(Velocity), T(Type of vehicles), EF(Emission factor)

확도와 주관적인 불확도로 구분하여 제시하였다. 객관적인 불확도 평가 방법으로 표본자료의 확률밀도함수에 근거한 정보와 배출량의 산정에 영향을 미치는 각 요인의 불확도를 조합하는 방법을 들 수 있다.

IPCC 가이드라인에서 제시한 불확도의 통계적인 접근은 표본자료에서 얻어진 추정값의 신뢰구간에 대한 평가와 추정된 확률밀도함수(PDF)의 분산 및 평균을 이용하여 불확도를 평가하는 것으로 구분할 수 있다. 확률밀도함수가 대칭인 경우 불확도 산정은 95% 신뢰구간의 한쪽 방향의 신뢰구간의 두 배를 평균으로 나누어진 값이다. Figure 1은 비대칭 확률밀도함수의 불확도 평가 방식을 설명한 것으로, 평균이 1.0 단위이고 2.5번째 백분위수(Percentile)는 0.5 단위이며 97.5번째 백분위수는 2.0 단위인 불확도는 -50~+100%로 표현된다(IPCC, 2006).

$$\text{불확도} = [P_{2.5} - \text{평균}, P_{97.5} - \text{평균}] \times 100$$

여기서 P_{α} 는 ($0 \leq \alpha \leq 100$)인 백분위수이다. 이외에도 IPCC가 불확도 산정에 대해서 몬테카를로 방법에 대한 순서도를 제시하고 있지만 구체성이 없고 자국의 방법론을 개발하라고 권고하고 있다.

따라서 온실가스 배출량 및 불확도 산정은 주어진 정보인 표본 활동자료 및 배출계수, 공인 및 비공인 된 관련 정보, 예상 모형의 결과 및 전문가 판단을 조합하게 되는데, 이때 표본을 활용할 경우 확률밀도함수의 추정이 필요하다. 특히 수집된 자료가 적을 경우 적용할 확률밀도함수 및 시나리오에 대한 전문가의 판단이 필요하다. 만약 적용될 확률밀도함수가 대칭이면 정규분포, t-

분포, 로그정규분포 등이 이용될 수 있다. 만약 비대칭 확률밀도함수가 적절한 분포로 사용되어야 하면 왜도 및 첨도와 같은 수치적인 값뿐만 아니라 분포의 개략적인 형태를 고려하여 감마분포, 와이블분포, 베타분포 또는 혼합분포 등을 생각할 수 있다.

결론적으로 온실가스 배출량의 불확도를 산정하기 위해서는 활동자료, 배출계수 그리고 기타 자료의 통계적인 분포 및 기타 통계적인 기법을 적용해야만 산정이 가능하다고 할 수 있다. 또한 2006 IPCC 가이드라인은 배출량의 불확도를 산정하는데 두 가지 대표적인 방법인 오차증식법과 몬테카를로 모의실험(Monte Carlo Simulation)을 들 수 있다. 오차증식법은 활동자료 및 배출계수에 대한 일부 가정들에 기초해서 단순한 스프레드시트 기반의 계산절차이고, 몬테카를로 모의실험은 확률밀도함수와 난수를 이용한 방법이다(Ramirez et al., 2008; Hastings et al., 2010; Monni et al., 2004; Winiwarter et al., 2001).

특히 우리나라 도로교통부에서 제공되는 활동자료인 연료소비량의 불확도를 확률밀도함수 추정으로 계산하는 것은 상당한 무리가 있다. 그 이유는 연료소비량이 연간으로 보고되는 보고통계이지 표본자료가 아니기 때문이다. 하지만 주행거리는 해마다 차종 및 용도에 따라서 표본자료로 축적이 되기 때문에 불확도 산정에 확률밀도함수 추정 또는 다른 통계적인 방법의 적용이 가능하다.

붓스트랩 및 몬테카를로

1. 붓스트랩

만약 활동자료 및 배출계수의 확률밀도함수가 주어진다면, 그 불확도는 앞에서 언급한 대칭 또는 비대칭에 따라서 주어진 분포의 95% 신뢰구간을 구한 후 그 결과를 얻을 수 있다. 또한 온실가스 배출량의 불확도는 오차증식법 또는 몬테카를로 기법을 적용하면 된다(IPCC 2006). 여기서 오차증식법은 각 자료의 불확도를 단순히 합산한 것으로 불확도의 요인이 증가하면 전체 불확도가 커지는 단점이 있다. 몬테카를로 기법은 주어진 자료 분포의 난수를 생성하여 결합하는 방법이다.

만약 확률밀도함수 추정이 어려울 경우 비모수적 기법 중의 하나인 붓스트랩이 불확도 산정에 적용될 수 있다. 붓스트랩은 분포의 조건 없이 배출량의 산정을 표본의

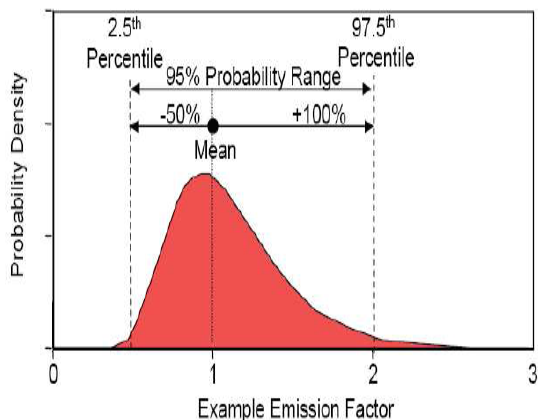


Figure 1. Uncertainty measurement in asymmetric probability distribution (IPCC guideline, 2006)

복원추출을 통하여 여러 개의 값을 생성하는 방법이다.

붓스트랩은 다음과 같은 절차를 따른다(Efron and Tibshirani, 1993).

[단계 1] 주어진 n 개의 표본(주행거리, 연비 또는 배출 계수)으로부터 n 개의 표본을 복원추출하여 표본평균(또는 다른 추정값)을 구한다 이 과정을 M 번 반복한다 ($i=1, \dots, M$). 여기서 표본평균을 \bar{Y}_i 라고 하자.

[단계 2] 붓스트랩으로부터 얻어진 M 개의 표본평균 (또는 다른 추정값)에서 전체 붓스트랩 평균 \hat{Y}_M 과 표준편차 $\hat{\sigma}_{Y_B}$ 를 다음과 같이 구한다.

$$\hat{Y}_M = \sum_{i=1}^M \bar{Y}_i \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}_{Y_M} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (\bar{Y}_i - \hat{Y}_M)^2}$$

[단계 3] 붓스트랩 추정량이 다음과 같이 정규분포를 따른다.

$$Z = \frac{\hat{Y}_M - \mu}{\hat{\sigma}_M} \sim N(0,1)$$

[단계 4] 단계 3으로부터 모수(μ)의 $(1-\alpha) \times 100\%$ 신뢰구간의 하한과 상한은 다음과 같다.

$$(\hat{Y}_M - z_{\alpha/2} \hat{\sigma}_{EM}, \hat{Y}_M + z_{\alpha/2} \hat{\sigma}_{EM}) \quad (4)$$

여기서 불확도는 붓스트랩의 표본으로부터 계산된 분산과 평균으로부터 ($k \times$ 분산/평균) $\times 100$ 으로 계산될 수 있다. 여기서 k 는 2로 하자.

붓스트랩은 활동자료나 배출계수 개별의 신뢰구간이나 불확도를 산정할 수 있는 비모수적인 방법이지만, 온실가스 배출량의 불확도를 산정하는데 IPCC는 오차증식법이나 몬테카를로 기법을 추천하고 있다. 오차증식법은 각 자료의 불확도를 단순한 합산되는 방식을 따르고 있어 불확도의 요소가 증가함에 따라 전체 불확도가 커지는 경향이 있다.

결론적으로 붓스트랩의 장점은 통계적 성질인 추정량의 불편성, 오차(불확도)의 측정 및 분석 그리고 저자가 생각하지 못한 문제를 해결할 수 있는 비모수적인 방법

이다. 또한 붓스트랩이 통계이론의 탄탄한 뒷받침으로 배출량 및 불확도 산정이 가능하게 한 것은 컴퓨터의 비약적인 발전도 한 몫을 하고 있다(Jhun, 1990).

2. 몬테카를로 방법

본 연구에서는 온실가스 배출량 및 불확도를 산정하기 위해서 몬테카를로 기법을 선택하였고 그 절차는 다음과 같다.

[준비] 활동자료 및 배출계수의 분포결정을 한다. 만약 분포결정이 어려우면 붓스트랩에서 표본평균(또는 다른 추정값)을 생성한다.

[단계 1] 활동자료(A_i) 및 배출계수(E_i)의 분포로부터 난수를 M 개를 생성한다($i=1, \dots, M$). 또는 붓스트랩에서 표본 평균(또는 다른 추정값)을 생성한다($i=1, \dots, M$).

[단계 2] 온실가스 배출량을 계산한다.

$$EM_i = A_i \times E_i, \quad i = 1, \dots, M$$

[단계 3] 단계 2로부터 M 개 온실가스 배출량 EM 의 평균 및 표준편차를 구한 후 신뢰구간 및 불확도를 계산한다.

$$\overline{EM}_M = \sum_{i=1}^M EM_i$$

$$\hat{\sigma}_{EM_M} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (EM_i - \overline{EM}_M)^2}$$

$$(\overline{EM}_M - z_{\alpha/2} \hat{\sigma}_{EM_M}, \overline{EM}_M + z_{\alpha/2} \hat{\sigma}_{EM_M})$$

$$UC = \frac{k \hat{\sigma}_{EM_M}}{\overline{EM}_M} \times 100$$

여기서 k 는 2로 하자. 온실가스 배출량의 산정식은 적용되는 대상에 따라서 다를 수 있다.

몬테카를로는 물리적인 실험이나 현실적인 관찰이 어려운 경우 가상의 조건을 가정하여 컴퓨터를 이용하여 반복적으로 난수를 이용하여 일정수의 결과를 수집하는 방법이다. 본 연구에서도 다양한 주행거리, 연비 그리고 기타 자료의 조건을 가정하여 몬테카를로 방법으로 가상 결과인 배출량이 일정수가 생성된다. 이 방법의 장점은 무작위로 차량의 주행거리 및 연비를 다양한 조합으로

Table 3. The statistical results of General-large-private car(gasoline) average distance traveled per a car in 2013

| Number of vehicles | | 571,909 |
|----------------------|-----------------------------------|----------|
| Location information | Maximum | 86.7589 |
| | Third quartile | 46.5008 |
| | Median | 32.0586 |
| | Mean | 34.8325 |
| | First quartile | 20.7385 |
| | Minimum | 0.0007 |
| Spread Information | Variance | 343.3663 |
| | Standard deviation | 18.5301 |
| | Range | 86.7482 |
| | Interquartile range | 25.7623 |
| Etc | Skewness | 0.5838 |
| | Kurtosis | 2.7599 |
| | Coefficient of Variation (CV) (%) | 53.1979 |

결합하고 그에 대응되는 연료소비량 및 배출량이 반복적으로 생성된다. 여기서 생성된 일정수의 배출량을 통계 분석을 수행하면 평균 배출량 또는 불확도가 결정된다 (Park, 2012).

실증분석

1. 주행거리 분석

휘발유를 사용하는 일반자가용자동차대형의 2013년 6월 31일 기준 등록대수는 1,086,421이고 연간 주행거리 분석에 이용된 표본수는 571,909으로 등록대수의 약 53% 비율로 상당히 높다. Table 3은 한 대당 일평균 주행거리의 요약통계로 최대 일일 주행거리가 약 86.75km 이고 최소값은 0.0007로 매우 짧은 거리를 기록했다. 또한 일평균 주행거리가 중앙값보다 다소 긴 약 34.83km 이고 일사분위수(약 20.74km)와 삼사분위수(약 46.50km)의 거리인 사분위범위(약 25.76km)에 표본자료의 50%가 분포되어 있다. 또한 왜도는 0.58로 거의 대칭(왜도=0)이며 첨도는 2.8로 정규분포(첨도=3)와 거의 유사하다. Table 4와 Figure 2은 일평균 주행거리의 형태를 수치(십분위수) 및 시각관점(핵밀도함수)에서 제공된 정보로 약 90% 자료가 일평균 주행거리가 약 6.2km에서 50.58km에 분포되어 있고 일평균 주행거리가 긴 쪽(오른쪽)에 자료들이 다소 멀리 퍼져 있는 것으로 나타났다. 활동자료인 일평균 주행거리의 불확도는 변동계수의 두 배인 약 106.3으로 산정되었다.

Table 4. The percentile for general-large-private car(gasoline) average distance traveled per a car in 2013

| Percentile (%) | km/day |
|----------------|---------|
| 2.5 | 0.0007 |
| 10 | 6.2067 |
| 20 | 12.7867 |
| 30 | 18.3447 |
| 40 | 23.0193 |
| 50 | 27.4744 |
| 60 | 32.0586 |
| 70 | 37.0708 |
| 80 | 43.0083 |
| 90 | 50.5788 |
| 97.5 | 61.7075 |

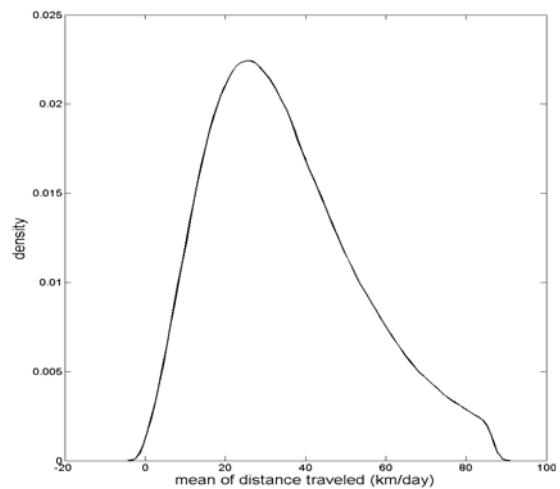


Figure 2. Kernel density function for general-large-private car (gasoline) average distance traveled per a car in 2013

2. CO₂ 배출량 및 불확도 산정

연간 CO₂ 배출량의 기준 산정식은 등록대수, 일평균 주행거리의 평균, 365일, 연비 및 배출계수의 곱으로 단 일값이 계산되지만 불확도의 산정은 불가능하다. 따라서 기존 방식으로 산정될 배출량은 불확도가 제공되지 않기 때문에 결과의 신뢰성을 부여할 수 없다.

하지만 본 연구가 제시한 붓스트랩 및 몬테카를로 방법으로 주어진 활동자료 및 배출계수에 적용하면 배출량 뿐만 아니라 불확도도 산정할 수 있다.

Table 5는 반복수 $M=10,000$ 으로 정한 붓스트랩 절차를 2013년 일반자가용자동차대형의 한 대당 일평균 주행거리에 적용하여 얻은 결과로 일평균 주행거리의 위치정보와 퍼짐정보 등을 제시하였다. 이를 통해서 한 대

Table 5. Summary of the bootstrap results of general-large-private car (gasoline) average distance traveled per a car in 2013

| | | |
|----------------------|-----------------------------------|---------|
| Location information | Maximum | 34.9263 |
| | Third quartile | 34.8492 |
| | Median | 34.8323 |
| | Mean | 34.8325 |
| | First quartile | 34.8157 |
| | Minimum | 34.7131 |
| Spread Information | Variance | 0.0006 |
| | Standard deviation | 0.0248 |
| | Range | 0.2131 |
| | Interquartile range | 0.0335 |
| Etc | Skewness | 0.0018 |
| | Kurtosis | 3.0276 |
| | Coefficient of Variation (CV) (%) | 0.0713 |

당 일평균 주행거리의 평균은 약 34.83km, 표준편차 0.0248km 그리고 범위가 0.21km로 계산되었으며, 불확도는 약 0.14%로 변동성이 크지 않은 것으로 판단된다. 또한 Table 6은 등록된 일반자가용자동차대형(1,086,421대)에 대한 연간 총 주행거리로 Table 5의 한 대당 일평균 주행거리에 365일과 등록대수의 곱으로 계산되었으며 불확도는 일평균 주행거리와 동일하지만 평균(약 138억km)과 표준편차(약 985만km)의 결과를 얻었다. 또한 왜도(0.0018)와 첨도(3.0276)로부터 연간 총 주행거리가 정규분포에 가까운 형태를 갖고 있다는 것을 알 수 있다.

최종적으로 2013년 일반자가용자동차대형에 대한 CO₂ 배출량과 불확도를 산정하기 위해서 연간 총 주행거리뿐만 아니라 연간 연비 및 관련 배출계수의 표본자료가 필요하다. 하지만 일반자가용자동차대형의 연간 연비는 2011년 에너지총조사에서 발표된 단일값 6.34km/ℓ이고 배출계수도 마찬가지로이다. 따라서 CO₂ 배출량의 불확도를 산정하기 위해서 연비에 대한 분포를 평균이 6.34km/ℓ이고 표준편차를 2.2로 가정하고 다른 배출계수는 단일값으로 설정하였다.

우선 2013년 일반자가용자동차대형(휘발유)의 CO₂ 배출량을 단순히 계산하면 연간 총 주행거리(일평균 주행거리, 등록대수 그리고 365일의 곱), 연비(6.34km/ℓ)와 기타 배출계수의 곱을 수행하여 얻은 결과인 약 1.96억(TC2)이다. 하지만 단일값의 정보만으로 배출량의 불확도를 계산할 수는 없다. 따라서 해당차량에 대한 CO₂ 배출량의 불확도는 표본자료인 주행거리, 가정된 연비의 분포 그리고 다른 배출계수를 단일값으로 가정하고 붓스트랩 및 몬테카를로 방법을 적용하여 얻을 수 있다.

Table 6. Summary of the bootstrap results of general-large-private car (gasoline) annual distance traveled in 2013

| | | |
|----------------------|-----------------------------------|------------|
| Location information | Maximum | 1.3850e+10 |
| | Third quartile | 1.3819e+10 |
| | Median | 1.3813e+10 |
| | Mean | 1.3813e+10 |
| | First quartile | 1.3806e+10 |
| | Minimum | 1.3765e+10 |
| Spread Information | Variance | 9.7029e+13 |
| | Standard deviation | 9.8503e+6 |
| | Range | 8.4512e+7 |
| | Interquartile range | 1.3278e+7 |
| Etc | Skewness | 0.0018 |
| | Kurtosis | 3.0276 |
| | Coefficient of Variation (CV) (%) | 0.0713 |
| Uncertainty(%)=2×CV | | 0.1426 |

CO₂ 배출량 및 불확도 산정 절차는 다음과 같다.

- [단계 1] 주어진 표본 주행거리(571,909대)로부터 붓스트랩을 이용하여 한 대당 일평균 주행거리 자료($M=10,000$)를 생성하고 연간 총주행거리를 계산한다. 단, 연간 총주행거리에 한 대당 일평균 주행거리, 365일 그리고 등록대수의 곱으로 계산된다.
- [단계 2] 평균이 6.34km/ℓ이고 표준편차를 2.2인 정규분포로부터 연간 연비 난수 571,909개를 생성한다. 단계 1과 동일한 방법으로 연간 평균 연비($M=10,000$)를 생성한다. 단, 연간 연비 난수의 개수는 주어진 주행거리의 차량대수보다 적게 설정할 수 있다.
- [단계 3] 단계 1과 단계 2로부터 생성된 연간 총 주행거리와 연간 평균 연비를 몬테카를로 기법을 적용하여 연간 총 연료소비량 자료($M=10,000$)를 생성한다.
- [단계 4] 단계 3으로부터 생성된 연간 총 연료소비량에 배출계수를 곱하여 CO₂ 배출량으로 환산한다.
- [단계 5] 단계 4에서 생성된 CO₂ 배출량의 통계적 분석 및 불확도를 산정한다.

Figure 3은 연비 가정에서 붓스트랩을 적용해서 생성된 10,000개 연간 평균 연비의 핵밀도함수로 대체적으로 평균(6.34km/ℓ)에 대칭으로 나타났다. Table 7은 2013년 일반자가용자동차대형(휘발유)의 연간 총 CO₂ 배출량을 산정하기 위해 적용된 붓스트랩과 몬테카

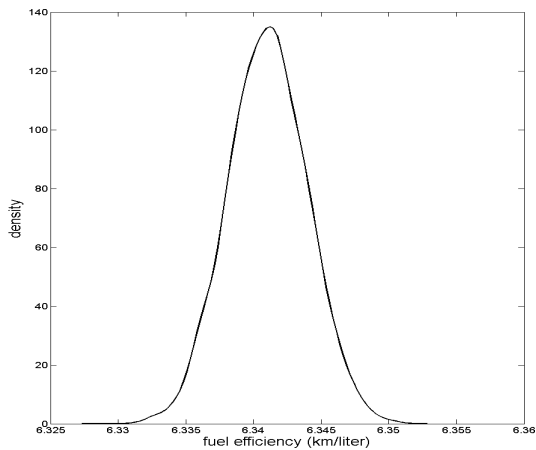


Figure 3. Kernel density function of annual fuel efficiency for General-large-private car (gasoline) in 2013

를로 방법으로부터 얻어진 요약 통계이다. 연간 총 CO₂ 배출량의 평균은 약 1.96억(TC2)이고 표준편차는 1.67만(TC2)으로 불확도는 약 0.17%로 산정되었다. 또한 왜도 및 첨도는 정규분포의 값과 매우 유사하다.

결론 및 제언

지금까지 도로교통부에서 CO₂ 배출량이 주행거리 (또는 연료소비량)와 배출계수의 단순 계산으로 도출되어 불확도의 산정이 불가능했다. 즉 2013년 일반자가용 자동차대형(휘발유)을 대상으로 수집된 연간 주행거리, 연비 그리고 배출계수의 단일값을 이용한 기존의 산정식은 연간 총 CO₂ 배출량이 약 1.96억(TC2)로 산정되었다고 제시할 수 있지만, 총 CO₂ 배출량의 변동성 및 신뢰성을 표현하는 불확도의 계산이 가능하지 않다는 것을 보여 주었다.

하지만 본 논문은 기존 산정식에서 이용된 동일한 활동자료 및 배출계수의 정보를 기초로 붓스트랩과 몬테카를로 방법을 적용하여 연간 총 CO₂ 배출량뿐만 아니라 불확도 산정을 수행하였다. 그 결과로 연간 총 CO₂ 배출량의 평균은 기존 산정식과 거의 동일한 약 1.96억(TC2)으로 계산되었고 배출량의 신뢰성을 나타내는 불확도는 0.171%로 산정되었다.

비록 본 연구가 제한된 대상(일반자가용자동차대형) 및 한정된 정보(연비)로 온실가스 배출량과 불확도를 산정했지만 현재 도로교통부 온실가스 배출량 및 불확도를 차종 및 용도별로 확장해서 수행할 수 있는 장점이 있

Table 7. Summary of the annual TCO₂ statistic for applied bootstrap and Monte Carlo to general-large-private car (gasoline) in 2013

| | | |
|----------------------|-----------------------------------|------------|
| Location information | Maximum | 1.9628e+8 |
| | Third quartile | 1.9575e+8 |
| | Median | 1.9564e+8 |
| | Mean | 1.9564e+8 |
| | First quartile | 1.9552e+8 |
| | Minimum | 1.9495e+8 |
| Spread Information | Variance | 2.7980e+10 |
| | Standard deviation | 1.6727e+5 |
| | Range | 1.3305e+6 |
| | Interquartile range | 2.2789e+5 |
| Etc | Skewness | -0.0165 |
| | Kurtosis | 3.0212 |
| | Coefficient of Variation (CV) (%) | 0.0855 |
| | Uncertainty(%)=2×CV | 0.1710 |

다. 하지만 이를 완성하기 위해서는 여러 기관(에너지경제연구원, 한국교통연구원, 석유공사)에 산재된 자료들(에너지총조사, 자동차이용실태조사, 석유통계)의 공유와 미흡한 자료인 연비 및 관련 정보의 확보가 시급하다. 또한 각 활동자료 및 배출계수가 내재하고 있는 단점을 보완할 수 있는 방법론이 마련되어야 할 것이다. 예를 들면 주행거리가 당해연도에서 도출된 것이 아니기 때문에 이를 보완할 수 있는 정보수집 및 조사가 필요할 것으로 생각된다.

REFERENCES

- Efron B., Tibshirani R. (1993), An Introduction to the Bootstrap, Chapman & Hall/CRC, New York.
- GIR (2014), 2013 National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea.
- Hastings A. F., Wattenbach M., Eugster W., Li C., Buchmann N., Smith P. (2010), Uncertainty Propagation in Soil Greenhouse Gas Emission Models: An Experiment Using the DNDC Model and at the Oensingen Cropland Site, Agriculture, Ecosystems and Environment, 136, 97-110.
- IPCC (2006), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 1, General Guidance and Reporting.
- IPCC (2006), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2, Energy.
- Jhun M. S. (1990), A Computer Intensive Method for

Modern Statistical Data Analysis I: Bootstrap Method and Its Applications, The Korean Journal of Applied Statistics, 3(1), 121-141.

KEEI (2013), 2011 Energy Consumption Survey.

KEEI (2013), 2013 Yearbook of Energy Statistics.

Kim T. H., Lee S. I., Ju Y. J., Son H. J. (2010), Improvement Study for Generated Greenhouse Gas (GHG) Amount Estimation from Transportation, Transportation Technology and Policy, 7(5), 69-79.

Monni S., Syri S., Savolainen I. (2004), Uncertainties in the Finnish Greenhouse Gas Emission Inventory, Environmental Science & Policy, 7(2), 87-98.

Park C. G., Soh J. Y., Lee Y. S. (2012), Estimation Methods of Fuel Consumption Using Distance Traveled: Focused on Monte Carlo Method, Journal of the Korean Data & Information Science Society, 23(2), 247-256.

Ramirez A., Keizer de C., Van der Sluijs J. P., Olivier J., Brandes L. (2008), Monte Carlo Analysis of Uncertainties in the Netherlands Greenhouse Gas Emission Inventory for 1990-2004, Atmospheric Environment, 42(35), 8263-8272.

Winiwarter W., Rypdal K. (2001), Assessing the Uncertainty Associated with National Greenhouse Gas Emission Inventories: A Case Study for Austria, Atmospheric Environment, 35(32), 5425-5440.

☞ 주 작성자 : 박용원

☞ 교신저자 : 박천건

☞ 논문투고일 : 2014. 9. 3

☞ 논문심사일 : 2014. 10. 23 (1차)

2014. 11. 6 (2차)

☞ 심사판정일 : 2014. 11. 6

☞ 반론접수기한 : 2015. 4. 30

☞ 3인 익명 심사필

☞ 1인 abstract 교정필