

CO₂ 전환계수와 배기가스 중의 CO₂ 배출량에 관한 연구

A Study on CO₂ Conversion Factor and CO₂ Emissions in Exhaust Gas

문재성* · 정석호* †

Jae-Sung Moon* and Suk-Ho Jung* †

(Received 19 May 2025, Revision received 25 June 2025, Accepted 25 June 2025)

초록 : 현존 선박에도 온실가스를 저감하는 방안을 적용하기 위해 CII가 적용되었다. CII 등급을 결정하는 수식에는 연료 중별로 CO₂ 전환계수가 정해져 있어 실제 연료의 온실가스 배출량을 완벽하게 제시한다고 하기는 어렵다. 따라서 CO₂ 전환계수가 온실가스 배출량을 잘 반영하는 것을 뒷받침하는 연구가 많이 필요하다. 본 연구에서는 천연가스의 질량분율에 따라 사용된 연료량을 기준으로 산출한 CO₂ 배출량과 배기가스에서 측정된 CO₂ 배출량을 비교하여 CII 등급에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 MARPOL에서 정한 CO₂ 전환계수에 천연가스 질량분율에 따른 CO₂ 배출 저감율이 0.0032x이고, 연료량을 기준으로 산출한 저감율은 0.0053x, 측정된 CO₂ 배출량을 기준으로 산출한 저감율은 0.0034x였다. 따라서 사용된 연료량을 기준으로 C_F를 적용하여 CII를 산출하는 것이 유리하다. 이를 바탕으로 2026년 백경호의 CII 등급을 산출한 결과, D등급으로 예상되지만 측정값을 기준으로 산출한 경우, 60% 이상의 천연가스를 사용하면 A등급이 될 수 있고, 사용된 연료량을 기준으로 산출하면 40% 이내의 천연가스를 사용해도 A등급이 될 수 있다는 것을 확인하였다.

키워드 : CO₂, CII, 전환계수, 천연가스, 디젤엔진

Abstract : ICII has been applied to existing ships to reduce greenhouse gases. Since the formula for determining the CII grade sets the CO₂ conversion factor by fuel type, it is difficult that it perfectly presents the greenhouse gas emissions of the actual fuel. Therefore, much research is needed to support that the CO₂ conversion factor reflects the greenhouse gas emissions well. In this study, the CO₂ emissions calculated based on the amount of fuel used and the CO₂ emissions measured in the exhaust gas according to the mass fraction of natural gas were compared to analyze the effect on the CII grade. As a result, the CO₂ emission reduction rate according to the natural gas mass fraction was 0.0032x for the CO₂ conversion factor set by MARPOL, the reduction rate calculated based on the amount of fuel was 0.0053x, and the reduction rate calculated based on the measured CO₂ emissions was 0.0034x. Therefore, it is advantageous to calculate the CII by applying C_F based on the amount of fuel used. Based on this, the CII grade of Baek Kyung Ho in 2026 is expected to receive a D grade, but if calculated based on measured values, it can be graded A if more than 60% of natural gas is used. And if calculated based on the amount of fuel used, it was confirmed that it can be graded A even if less than 40% of natural gas is used.

Key Words : CO₂, CII, Conversion Factor, Natural Gas, Diesel Engine

* † 정석호(<https://orcid.org/0000-0002-6268-5864>) : 교수, 국립부경대학교 기계시스템공학전공

E-mail : sukhojung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6198

*문재성(<https://orcid.org/0009-0008-1296-7098>) : 대학원생, 국립부경대학교 기계시스템공학과

* † Suk-Ho Jung(<https://orcid.org/0000-0002-6268-5864>) : Professor, Major of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

E-mail : sukhojung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6198

*Jae-Sung Moon(<https://orcid.org/0009-0008-1296-7098>) : Graduate student, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

1. 서 론

국제해사기구(IMO)는 80차 해양환경보호위원회를 개최하여 2050년까지 온실가스의 배출을 0으로 달성하는 것을 목표로 상향 조정하여 꾸준히 노력해 가고 있다. 2021년 개최된 MEPC 76차 회의에서는 2030년까지 40%라는 평균감축을 위해 현존 선박에서도 온실가스를 저감하는 방안을 마련하기 위해 해양오염방지협약(MARPOL)의 개정안을 채택하였다. 그 주요 내용은 현존 선박에 에너지효율지수를 적용하는 EEXI(Energy Efficiency eXisting Index)와 운항하는 선박의 연료 소비량을 기준으로 작성되는 탄소집약도를 적용하는 CII(Carbon Intensity Indicator)이다.¹⁾ CII는 유명무실한 선박에너지효율운항지수(EEOI)를 대신하여 운항선박이 스스로 온실가스 저감을 하도록 만드는 정책이다. EEOI는 연간 운항거리에 소모된 연료소비량을 기준으로 산출된 온실가스 배출량을 작성하여 선박에너지효율관리계획(SEEMP)에 포함시키는 것으로 온실가스 저감에 대한 강제성이 미미하였다. CII는 5등급(A, B, C, D, E)으로 나누어 3년 연속 D등급을 받은 선박과 E등급을 받은 선박은 운항 정지를 받게 되고 높은 등급으로 시정하기 위한 SEEMP를 작성하고 검토를 받아야 운항을 재개할 수 있다. 또한 매년 요구되는 온실가스 감축량이 많아지도록 적용하기 때문에 동일한 연료 사용량은 등급을 떨어지게 된다. 따라서 모든 선박들이 온실가스를 저감하는 자구책을 마련하지 않으면 안 된다.

한편, 대체연료의 온실가스 저감량을 명확하게 하는 것은 매년 IPCC 2006 가이드라인에 따라 제출할 때 사용되는 계수들을 타당하게 지정하는데 도움이 된다. 따라서 현재 많이 사용되고 있는 천연가스에 대한 온실가스 저감의 영향을 명확하게 확인해 줄 필요가 있다. 지금까지 LNG의 사용에 따라 이산화탄소의 배출량이 줄어드는 것에 대한 실험적 연구 결과가 다양하다.^{2,3)} 그중에서 Kim and Jung(2020)의 연구 내용에는 Fig. 1에 나타난 것처럼 경유 대비 천연가스의 비중이 0.4552의 비율로 CO₂의 감소가 일어나고 있음을 제시

하였다. 약간의 실험 조건에 따라 약간의 차이가 있기는 하지만 MARPOL에 제시되어 있는 저감량에 비례하는 형태를 나타내고 있음에 동의할 수 있다. 그러나 실제 실험을 통해서 데이터를 분석하여 보면 배기가스 중에서 계측된 CO₂ 배출량과 사용된 연료량에 CO₂ 전환계수(C_F: Conversion factor)를 곱하여 산출되는 CO₂ 배출량에는 차이가 있다. 이러한 차이는 정확한 온실가스 배출량을 보고해야 하는 IPCC 2006 가이드라인에 위배된다고 볼 수 있다. 따라서 둘 중 어떤 것이 더 정확한 것인지에 대한 다양한 연구의 필요성이 있다.

본 연구에서는 두 CO₂ 배출량 계산 방법에 따라 천연가스 질량분율이 CO₂ 감소율에 미치는 영향을 검토하고 실습선 백경호의 CII 등급에 미치는 영향에 대해서 알아보고자 한다.

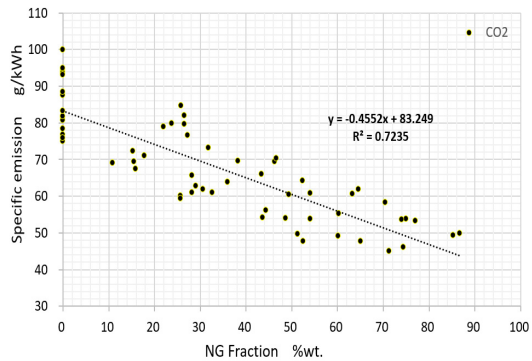


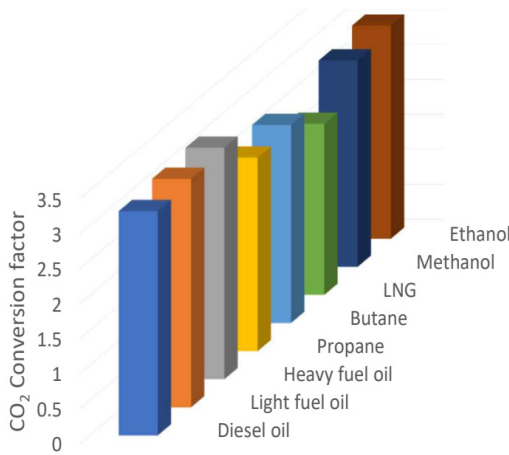
Fig. 1 CO₂ specific emission according to natural gas mass fraction³⁾

2. CO₂ 전환계수 및 CII 계산 방법

Table 1은 MARPOL 협약서 ANNEX VI에 제시된 연료별 C_F로 연료를 1kg 사용하였을 경우 발생되는 CO₂의 발생량을 kg 단위로 나타낸 수치이다. C_F는 동일한 질량을 연소했을 때 나오는 CO₂의 발생량으로, 동일한 에너지(kJ)를 발생하기 위해서는 발생하는 CO₂양이 달라진다. 이를 비교한 값을 Fig. 2에 나타낸다. C_F가 경유에 비해 42.9%밖에 안 되는 메탄올의 경우, 동일 에너지로 비교하면 경유의 92.0%로 수치가 올라갔다. 그리고 LNG의

Table 1 Parameter values according to type of fuel

Type of fuel	LCV (kJ/kg)	Carbon content	C _F (CO ₂ ton/ton)
Diesel oil	42,700	0.8744	3.206
Light fuel oil	41,200	0.8594	3.151
Heavy fuel oil	40,200	0.8493	3.114
LPG	Propane	0.8182	3.000
	Butane	0.8264	3.030
LNG	48,000	0.7500	2.750
Methanol	19,900	0.3750	1.375
Ethanol	26,800	0.5217	1.913

Fig. 2 Conversion factors by fuel type according to energy standards (CO₂kg/MJ)

경우는 85.8%였던 것이 76.3%로 수치가 내려갔다. 따라서 제시된 연료 중에서는 동일 에너지 발생 시 가장 적은 CO₂를 발생하는 연료는 LNG이다.

한편, 2023년 1월1일부터 시행에 들어간 CII는 아래 식 (1)~(3)에 의해 구해진 허용(또는 요구) CII(CII_{req})에 선종별 등급 범위를 정하기 위한 dd vector를 곱하면 Fig. 2에 나타낸 것처럼 등급 산정이 완료된다. 선박이 3년 연속 D등급을 받거나 한 번만이라도 E등급을 받으면 운항 정지가 되며, SEEMP에 등급 시정이 가능한 방안을 관할 기관에 제출하고 기관의 검토 후 승인을 통해 출항이 가능하게 된다. CII 허용값을 계산하기 위해서는 먼저 대상 선박의 달성 CII(CII_{ship}) 값을 식 (1)을

통해 구한다.

$$CII_{ship} = \frac{\sum(FC_j \times C_{Fj}) \times 10^6}{Capacity \times TDT} \quad (1)$$

여기서, FC는 연료의 연간 사용량(ton), j는 연료의 종류, Capacity는 선종별로 총톤수 또는 재화중량톤수(ton), TDT는 연간 운항한 거리(nm)이다. 그리고 10⁶을 곱하는 이유는 단위 환산(g/ton-nm)을 위해서다. 그리고 기준 CII(CII_{ref})값을 선정해야 하는데, 이는 식 (2)를 통해 계산할 수 있다.

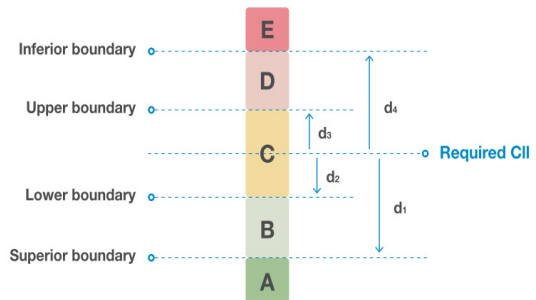
$$CII_{ref} = aCapacity^{-c} \quad (2)$$

여기서, a와 c는 MARPOL 협약서 ANNEX VI에 제시된 선종별 매개변수이다. 그리고 CII_{req} 구하기 위해서 식 (3)을 사용한다.

$$CII_{req} = (1 - \frac{Z}{100}) \times CII_{ref} \quad (3)$$

여기서, Z는 감축 계수로 연도별로 상이하게 적용된다. 현재로서는 23년부터 25년까지 5%로 시작해 매년 2%씩 증가하도록 확정했는데, 27년부터는 검토를 통해 다시 정할 예정이다.

그리고 마지막으로 선종별로 d1~d4까지의 dd vector를 CII_{req}에 곱하여 Fig. 3과 같이 등급을 확정하게 된다. 예를 들어 CII_{ship} 값이 d4와 CII_{req} 곱값보다 크게 되면 E등급을 받게 되고, d3와 CII_{req} 곱값 사이가 되면 D등급을 받는다.

Fig. 3 Calculating method of CII grade and grade range⁴⁾

3. 실험장치 및 방법

3.1 천연가스 이중연료 실험 장치^{2,3)}

천연가스 이중연료 실험은 J. M. Cheon et al.²⁾과 K. H. Kim et al.³⁾에 의해 진행된 것으로, 기관 회전수 2,000 rpm에서 엔진 부하를 11.7 kW, 23.4 kW, 35.0 kW로 변경하면서 천연가스의 질량비율을 변경하며 실시하였다. 경유의 파일럿 분사는 13°BTDC로 일정하게 설정하였고, 커먼레일의 압력은 50~80 MPa로 10 MPa씩 변경하였다. 모든 실험은 조건을 변경한 후 약 5분간 안정기를 거친 후 데이터 계측을 실시하였고 각종 엔진의 온도를 통해 운전의 안정 여부를 판단하였다. Table 2에 실험 조건에 대해서 나타내었다.

Table 2 Experimental conditions

Output kW	Pcr MPa	NG %wt.
11.7	50~70	0~77
23.4	50~80	0~87
35.1	60~80	0~85

3.2 실습선 CII 계산 방법

국립부경대학교 실습선 백경호의 2024년 2월 1일부터 2025년 1월 31일까지의 운항 실적을 Table 3에 나타내었다. 백경호의 연료는 Light fuel oil로 가정하여 C_F는 3.151를 사용하였다. 주기관과 보조기관 및 보일러에 사용된 총연료는 458.35ton이며 총 운항 거리는 9599 nm이다.

CII의 연료 사용량은 연도별로 작성하게 되어 있으나 백경호는 실습선으로 운항 일수가 일반 선박에 비해서 작기 때문에 매년 운항 일정이 비교적 겹치지 않는 2월 1일을 기준으로 하였다. 그리고 화물을 싣지 않기 때문에 크루즈 여객선을 기준으로 계수를 설정하고 그 결과는 다음과 같다.

$$CII_{ship} = \frac{458.35 \times 3.151 \times 10^6}{3990 \times 9599} = 37.7 \quad (4)$$

$$CII_{ref} = 930 \times 3990^{-0.383} = 38.84 \quad (5)$$

$$CII_{req} = \left(1 - \frac{7}{100}\right) \times 38.84 = 36.12 \quad (6)$$

여기에, dd vector를 곱한 값을 Table 4에서 확인할 수 있다. 백경호의 CII_{ship}는 37.7 gCO₂/ton·nm 이므로 C등급에 해당된다. 그러나 2026년에도 동일한 거리에 동일한 연료를 사용한다면 d3보다 낮게 되어 D등급을 받게 된다.

Table 3 Total sailing distance and fuel consumption of training ship for 1 year

Total sailing distance (nm)		9599.00
Fuel consumption (ton)	M/E	250.80
	G/E	205.65
	Boiler	1.90
Total fuel consumption (ton)		458.35

Table 4 Experimental conditions

	d1	d2	d3	d4
Cruise	0.87	0.95	1.06	1.16
2024	31.42	34.31	38.29	41.90
2026	30.08	32.84	36.64	40.10

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 천연가스 질량비에 따른 CF와 CO₂ 비율

Fig. 4에 천연가스의 질량비율에 따른 C_F와 CO₂의 저감 특성을 나타내었다. 파란 선으로 나타낸 ‘CO₂ CF’는 천연가스 질량비율이 증가함에 따라 C_F가 줄어드는 정도를 나타낸 것으로 다음 식에 따라 계산되었다.

$$CO_2 CF = CF_{DO} \times (1 - P_{NG}) + CF_{NG} \times P_{NG} \quad (7)$$

여기서, CF_{DO}는 에너지 단위당 경유의 CO₂ 전환계수로 3.206이며, CF_{NG}는 천연가스의 전환계수로 2.446이다. P_{NG}는 천연가스 질량비율을 나타내며 0~1의 값을 갖는다. 천연가스 질량비율이 0일 경우, 경유의 전환계수와 동일한 3.206이지만 천

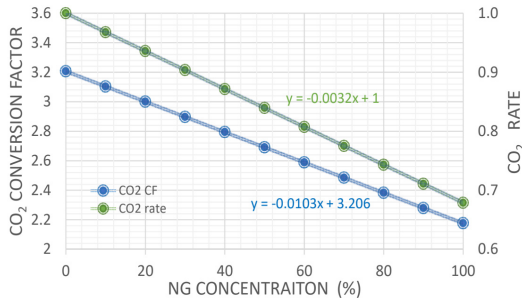


Fig. 4 Reduction characteristics of C_F and CO_2 according to natural gas rate

연가스 질량비율이 증가하면 0.0103의 비율로 줄어든다.

초록색 선으로 나타낸 CO_2 rate는 경유가 발생 시 CO_2 배출량을 1로 했을 때 천연가스 질량비율이 증가함에 따라 CO_2 가 줄어드는 비율을 나타낸 것이다. CO_2 C_F 의 기울기는 0.0103인 반면, CO_2 rate의 기울기는 0.032로 나타났다. CO_2 rate를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$CO_2 \text{ rate} = -0.0032 \times P_{NG} + 1 \quad (8)$$

즉, 경유의 발열 에너지를 기준으로 천연가스 질량비율이 증가함에 따라 0.32%의 온실가스배출이 이론적으로 감소한다는 것을 알 수 있다. 이 기울기가 Fig. 5에 나타낸 기울기와 연관성을 통해 천연가스 이중연료 디젤엔진의 온실가스 저감에 대한 연구가 필요함을 입증할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 Fig. 1에 나타내었던 천연가스 이중연료 실험 결과를 바탕으로 공급된 연료를 기반으로 계산된 CO_2 배출량(CO_2 F)과 배기가스 중에서 측정된 CO_2 배출량(CO_2 E)을 나타내었다. 이 결과에서 Fig. 4에서 설명한 것과 동일한 방법으로 얻어진 1차 방정식 추세를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$CO_2 E = -0.0034 \times P_{NG} + 0.9922 \quad (9)$$

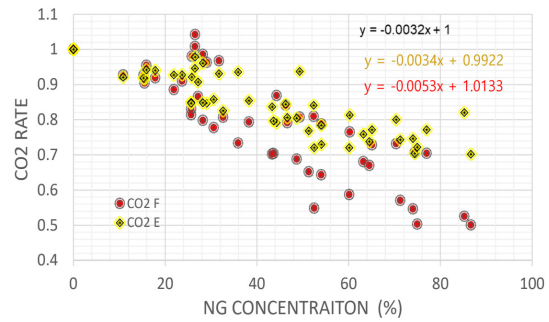


Fig. 5 Reduction characteristics of CO_2 according to calculate method

$$CO_2 F = -0.0053 \times P_{NG} + 1.0133 \quad (10)$$

식 (8)과는 달리 데이터의 추세선으로 나타내었기에 $\times$ 뒤의 숫자는 1이 아니기 때문에 4.2절의 계산에서 천연가스 질량비율이 0인 경우는 제외하였다. CO_2 E의 기울기는 0.0034로 IMO에서 제시한 방법에 따른 기울기와 비슷하지만, CO_2 F의 기울기는 0.0053으로 IMO에서 제시한 기울기보다 65% 정도 가파르다. 즉, 연료로 계산한 방법이 CO_2 를 더 적게 배출하는 것으로 나타낼 수 있다. 따라서 본 실험에 한해서는 배기가스 중의 CO_2 측정량보다는 연료로 C_F 를 이용하여 산출한 것이 배출량이 더 적어진다는 것을 확인하였다.

4.2 C_F 와 CO_2 측정량에 따른 배경호 CII 비교

Fig. 5의 결과에 따라 천연가스 질량비율에 따른 배경호의 CII가 얼마나 개선될 수 있는지에 대해서 계산한 결과를 Fig. 6에 나타낸다. 계산 방법은 식 (1)의 분자에 식 (9)과 (10)을 대입하였고, 천연가스 비율이 0인 경우에 대해서는 따로 계산하지 않았다. 계산 결과에 따르면, CO_2 F의 경우, 천연가스 질량비율을 40%를 활용한다면 2026년에도 A등급을 받을 수 있고, CO_2 E의 경우에는 천연가스 질량비율을 60%를 초과해서 활용한다면 2026년에도 A등급을 받을 수 있다. 따라서 40~60%의 천연가스 활용으로 D등급에서 A등급으로 전환이 가능하다.

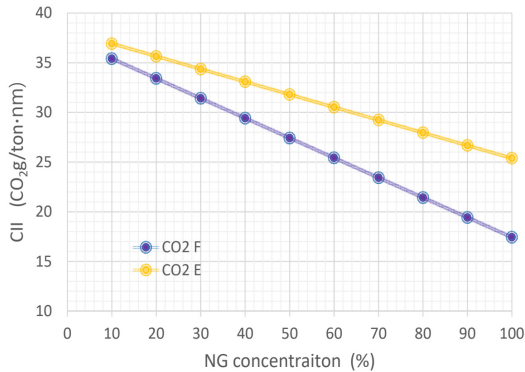


Fig. 6 Reduction characteristics of CII according to calculate method

5. 결 론

국립부경대학교의 실습선 백경호의 1년간 운항 데이터를 활용하고 천연가스 이중연료 디젤엔진의 연료와 측정량을 기반으로 산출된 CII의 특성을 검토한 결과는 다음과 같다.

1) C_F 를 질량단위가 아닌 필요로 하는 에너지 단위로 환산한 경우, 알콜은 경유와 비슷하게 높아졌고, 천연가스는 더 낮아져 경유의 76.3%가 되었다.

2) MARPOL 규정에 제시된 C_F 로 계산한 결과, 천연가스 질량 비율에 따른 CO₂의 감소율 기울기는 0.0032였다.

3) 배기가스에서 측정된 CO₂ 발생량 데이터를 기반으로 추정된 CO₂ 감소율 기울기는 0.0034로 규정에 제시된 기울기와 비슷하였다.

4) 사용된 연료를 기반으로 추정된 CO₂ 감소율 기울기는 0.0053으로 규정에 제시된 기울기에 비해 65% 더 많이 감소하였다.

5) 백경호의 경우, 2026년도 CII등급이 D가 예상되었으나 배기가스 중의 CO₂ 기준으로는 60%의 천연가스를 사용하면 A등급을 받을 수 있고, 연료 사용량 기준으로는 40%의 천연가스를 사용하면 A등급을 받을 수 있다.

추후 여러 선박으로부터의 데이터를 취득하여 국가 온실가스 인벤토리와 접목하여 C_F 의 적절한 값을 찾는 연구를 진행할 계획이다.

후 기

이 논문은 2022학년도 부경대학교 연구년 교원 지원사업에 의하여 연구되었음.

Author contributions

S. H. Jung; Conceptualization, Formal analysis, Funding acquisition, Supervision. J. S. Moon; Investigation, Resources, Validation, Writing-review & editing.

References

- <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC76meetingsummary.aspx>.
- J. M. Cheon, M. T. Zin and S. H. Jung, 2020, "Effect of common-rail pressure and natural gas proportion on performance of dual fuel diesel engine", *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, 44(2), 133-138. (<https://doi.org/10.5916/jamet.2020.44.2.133>)
- K. H. Kim and S. H. Jung, 2020, "Emission Characteristics of Dual Fuel Diesel Engine in Accordance with Common-rail Pressure and Natural Gas Mass Proportion", *Journal of The Korean Society for Power System Engineering*, 24(3), 98-103. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.3.098>)
- J. Y. Lee, J. S. Park, K. W. Chen, Y. J. Heo and T. H. Lee, 2021, "Guidelines for CII", Korea Register, Busan, 14-18.
- <https://yearbook.enerdata.net/co2/emissions-co2-data-from-fuel-combustion.html>.