



자동차 CO₂ 배출가스 배출단위 변환방법 고찰

†한정옥 · 김형태

한국가스공사 가스연구원

(2018년 12월 18일 접수, 2019년 4월 24일 수정, 2019년 4월 25일 채택)

A Study on the Conversion Method of CO₂ Emission Unit of Automobiles

†JO Han · HT Kim

Research Institute of KOGAS 1248 Suinro, Ansansi, Gyeonggi-do, 15328, Korea

(Received December 18, 2018; Revised April 24, 2019; Accepted April 25, 2019)

요 약

본 연구에서는 차대동력계 시험에서 수집한 자동차 배출가스자료를 엔진동력계에서 측정되는 동력계 단위로 변환하는 방법을 제안하였다. 엔진동력계 시험은 소요시간이 길고 비용이 높아 적용이 제한적일 경우 간편한 방법인 차대동력계 시험이 선호될 수 있다. 환산 방법은 거리기준 배출가스 자료에 모드 엔진효율을 고려하여 동력단위로 환산하는 방법이며 CO₂ 성분에 대해서 적용한 결과 환산 결과와 측정 결과 사이에 우수한 상관성을 확인하였다. 이 방법을 해외자료에 적용할 경우 CO₂ 배출성능에 대해 0.1% 이내로 일치함을 보였으나 CO, NO_x 및 THC 와 같은 미량 배출성분 들은 같은 환산방법을 적용하기에는 상관성이 다소 떨어지며 추가적인 고려가 필요함을 보였다.

Abstract - We proposed a method to convert the CO₂ emission data of vehicles collected from the chassis dynamometer test from distance unit to energy unit which generally measured from the engine dynamometer tests. In the future, if engine dynamometer tests are limited, it is expected to be applied as an alternative method to calculate CO₂ emission based on energy unit through the chassis dynamometer test. At this moment, engine efficiency is required and the test mode average efficiency should be used to improve the accuracy, not the result derived from specific speed and load conditions. Also, this method was applied to foreign data and the results were within 0.2%. However, CO, NO_x and THC which have very low emission characteristics except CO₂, are limited by the method proposed in this study and need to be considered separately.

Key words : emission units, CO₂, engine dynamometer test, chassis dynamometer test, conversion method, conversion factor

1. 서 론

중대형 자동차의 배출가스 측정방법은 엔진 동력계에서 정해진 모드로 측정하도록 되어 있다¹⁾. 현재 자동차 배출기준인 EURO6 기준은 WHTC (World Harmonized Transient Cycle) 모드로 엔진 동력계 상에서 측정하도록 되어있으며 배출물을 단

위 동력당 증량으로 측정하여 최종 g/kWh 단위로 정리된다. 이러한 시험방법은 엔진 설치 및 동력계와의 측 연결 등 준비과정이 복잡하고 시간소요가 불가피 하다. 따라서 비용이 상대적으로 높다.

한편 차대동력계 시험은 간편하게 차량상태에서 시험할 수 있는 장점이 있어 시간과 비용이 절약될 수 있으며 특히, 운행차의 성능평가에 유용한 수단 이 될 수 있다. 화물차나 전세버스와 같은 중·대형 차량의 경우 타 연료에서 천연가스로 전환할 때 성능 평가 방법으로 차대동력계 측정방법이 매우 효과

†Corresponding author:johan@kogas.or.kr
Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

적이다. 그러나 차대동력계 측정방법은 측정 단위가 g/km로 되어있어 주행 거리당 배출중량이 산출됨으로서 단위동력당 배출중량을 측정하는 엔진동력계 시험 결과와 상호 비교나 변환이 어렵다.

본 연구에서는 배출가스 성능을 거리 기준단위에서 동력 기준단위로 간편하게 환산하는 방법을 고찰하고 배출가스 측정결과에 대해 변환방법의 가능성을 제시하고자 한다.

II. 배출가스 측정 및 배출단위 변환

2.1 시험엔진 및 차량

차량의 배출가스 배출단위 특성을 파악하기 위해 Table 1과 같이 11리터급 엔진을 탑재한 HCNG 버스에 대해 평가한 결과와 동일엔진에 대해 엔진동력계에서 시험한 결과를 활용하였다. 엔진동력계 시험은 국제시험모드인 WHTC 시험 결과이며 차대동력계 시험은 WHVC(World Harmonized Vehicle Chassis dynamometer test)모드와 KATECH 모드, BUSAN 모드에서 대해 시험한 결과 이다.

거리기준 온실가스 결과와 동력기준 결과의 상관성을 검토하기 위해 몇 가지 조건이 필요하다. 두 가지 경우가 상관성을 유지하려면 다음과 같은 특성이 전제되어야 한다.

- 1) 실험 대상 엔진과 차량에 적용된 엔진이 동등 사양으로 엔진 효율이 유사한 것으로 가정하는데 무리가 없어야 한다.
- 2) 측정모드가 상호 연계성이 있어야 한다. 즉, 엔진동력계 시험의 경우와 차대동력계 시험의 측정모드에 대한 부하 특성이 유사해야 한다.

이러한 요소들은 독립적인 측정 방법들이 상호

Table 1. Specifications of tested HCNG bus

| Items | specifications |
|---------------------------|------------------|
| Engine volume | 11 liter |
| Vehicle type | BS106 |
| Fuel type(vol %) | CNG 70% + H2 30% |
| Compression ratio | 12.0 |
| CVW(kg) | 10,470 |
| GVW(kg) | 14,110 |
| Tested inertia Weight(kg) | 12,290 |

연계성을 갖기 위해 필요한 내용이다. 엔진의 성능 자료와 차량의 성능 자료간 연결 고리는 엔진동력계 시험에서의 연료소비율과 차대동력계 시험의 연비 결과를 활용하는 방법이다²⁾. 이 밖에 차대동력계 시험에서 소요 동력을 측정하여 거리당 결과를 동력당 결과로 환산하는 방법도 가능하다. 여기서는 연료소비율 자료를 이용하는 방법으로 접근하였다. HCNG 엔진과 HCNG 차량은 동일한 엔진을 사용하였으므로 엔진성능 자료와 차량 성능자료 간에 상호 연관성이 있다고 볼 수 있으며 엔진시험과 차대동력 시험도 WHTC모드와 WHVC 모드로 부하변동이 서로 유사성이 있어 배출가스 단위 변환을 확인하는데 무리가 없을 것으로 판단된다.

2.2 모드시험 결과

Table 2는 한국기계연구원에서 엔진동력계상에서 WHTC모드로 측정된 시험 결과³⁾이다. 시험결과로 엔진동력과 연료사용량 결과와 배출가스 결과가 엔진동력당 배출량으로 표시되어있다. Table 3은 차대동력계 시험결과로 WHVC모드와 KATECH 및 BUSAN모드 결과⁴⁾가 거리당으로 표시되어있으며 연비는 탄소중량법으로 산출된 결과⁵⁾이다. 이때, 두 가지 시험결과 모두 연료물성은 CNG에 수소가 30%(체적기준) 혼합된 HCNG 물질이다.

2.3 단위환산 방법

차대동력계 실험결과인 Table 3의 HCNG버스 결과는 Table 2의 HCNG엔진 동력계 배출가스 결과와 연관성이 있을 것으로 기대된다. 두 결과는 기준단위가 달라 직접비교가 어렵기 때문에 변환방법을 고찰하고자 한다. 엔진 동력계 시험조건과

Table 2. Test results of engine emissions by WHTC mode

| 구 분 | Test result | Units |
|------------------|-------------|-------|
| Cycle work | 17.41 | kWh |
| Fuel consumption | 3.73 | kg |
| bsfc | 214.46 | g/kWh |
| CO | 1.09 | ↑ |
| NMHC | 0.007 | ↑ |
| CH4 | 0.028 | ↑ |
| NOx | 0.22 | ↑ |
| CO2 | 567.2 | ↑ |

Table 3. Results of vehicle emissions by mode tests (HCNG bus)

| 구분 | WHVC | KATECH | BUSAN | Units |
|---------|--------|--------|-------|--------------------|
| THC | 0.36 | 0.63 | 0.62 | g/km |
| CH4 | 0.32 | 0.60 | 0.58 | ↑ |
| Nox | 0.07 | 0.00 | 0.04 | ↑ |
| CO | 1.86 | 4.88 | 5.53 | ↑ |
| CO2 | 485.7 | 718.4 | 701.0 | ↑ |
| sfc | 3.172 | 2.138 | 2.187 | km/Nm ³ |
| LHV | 30.70 | ← | ← | MJ/Nm ³ |
| density | 0.5839 | ← | ← | kg/Nm ³ |

차대동력계 시험조건이 유사할 경우 상관성이 있을 것으로 가정하고 동일 엔진을 사용하여 실험한 엔진동력계 시험 결과와 동일엔진을 장착한 차량을 차대동력계로 실험한 결과를 분석하였다.

우선 엔진동력계 실험에서 측정된 연료 소비율 결과로부터 HCNG 엔진 효율을 도출할 수 있다. 즉, 연료의 저위발열량(30.70 MJ/Nm³)과 밀도(0.5839kg/Nm³)로 부터 입력에너지를 계산하고 이를 연료소비율(214.46g/kWh)과 비교하면 아래와 같이 엔진 효율을 구할 수 있다. 이 효율은 주어진 모드시험 조건에서 엔진의 평균효율이며 이 결과는 시험모드에 따라 달라질 수 있다. 즉, 고속조건을 대표하는 모드 조건과 저속 조건을 대표하는 모드 조건은 엔진의 부하와 엔진 회전수가 다르기 때문에 엔진 효율이 달라진다. WHTC모드로 시험한 엔진 효율은 31.9%로 계산된다.

$$\text{WHTC모드 엔진 효율} = (0.5839/30.70 \times 3,600) / 214.46 = 31.9\%$$

한편, 차대동력계 시험 중 WHVC모드로 측정된 배출가스 정보로부터 탄소평형법에 의해 연비를 산출하여 연료제적당 주행거리 자료를 도출할 수 있다. 이 결과로부터 투입 에너지를 기준으로 주행거리 정보가 나오면 여기에 엔진 효율을 고려하여 엔진에서의 발생 동력을 산출할 수 있으며 단위 동력당 주행거리를 가늠할 수 있는 환산계수가 도출될 수 있다. 아래와 같이 HCNG 자동차를 WHVC모드로 평가할 경우 환산계수는 1.169km/kWh 임을 알 수 있다.

Table 4. Results of conversion factor for HCNG bus mode tests

| 시험모드 | 연료소비율 (g/km) | 모드엔진 효율(%) | 환산계수 (km/kWh) |
|--------|--------------|------------|---------------|
| WHVC | 3.172 | 31.9 | 1.169 |
| KATECH | 2.187 | ↑ | 0.788 |
| BUSAN | 2.138 | ↑ | 0.806 |

$$\begin{aligned} \text{환산계수(WHVC모드 경우)} &= \text{연비} / \text{저위발열량} / \text{효율} \\ &= 3.172(\text{km}/\text{Nm}^3) / 30.70(\text{MJ}/\text{Nm}^3) \times (3,600/1,000) / 0.319 \\ &= 1.169(\text{km}/\text{kWh}) \end{aligned}$$

이 결과를 차대동력계 실험 결과에 적용하여 동력 단위 기준(g/kWh)의 배출가스 결과를 거리단위 기준(g/km)으로 변환하여 비교하면 변환방법의 타당성을 평가할 수 있다. 또한, 서로 다른 시험모드의 결과로 부터 특정 모드의 결과로 환산 가능성을 알아보기 위해 Table 3에 정리된 KATECH 모드와 BUSAN 모드의 결과에 적용하여 환산계수를 구하면 각각 0.788km/kWh와 0.806km/kWh의 환산계수를 얻을 수 있다. Table 4에 정리한 결과에서 알 수 있듯이 모드에 따라 환산계수의 차이가 있으며 이 경우 엔진효율을 WHTC모드 결과를 적용하였기 때문에 모드 간 차대동력계 시험결과를 WHTC 모드에서 측정되는 동력당 배출량 결과로 환산할 수 있는지에 대한 가능성도 조사하였다.

III. 분석 결과

3.1 단위환산 결과

Table 5에 차대동력계(WHVC 모드)로 측정된 전체 배출가스에 대해 환산계수를 적용하여 단위 변환 결과를 비교하였다. 여기서 주목할 것은 단위 변환 결과와 실제 측정된 결과의 차이는 측정방법의 차이로 발생된 것이며 앞에서 언급하였듯이 배출가스 측정방법으로 제시된 엔진동력계 측정방법이 기준이 되어야 한다. 그럼에도 온실가스(CO₂ 배출량) 산출결과는 차대 동력계를 이용한 방법으로도 상당히 정확한 결과를 도출할 수 있음을 보여준다.

미량 배출되는 CO, THC 및 NOx 결과는 측정값과 변환값 사이에 상관성을 찾기 어려운 것으로 나타났으며 이는 미션과 타이어에서의 동력전달 효율과 운전 모드의 차이 등으로 변환방법이 한계가 있음을 알 수 있다. 결과적으로 온실가스를 대표하는 CO₂의 경우는 변환 결과가 측정결과와 매

우 밀접한 관계가 있음을 확인하였다. 즉, 온실가스 평가방법으로 동력 기준과 거리기준의 결과가 서로 일치하고 있으며 상호 환산하여 사용할 수 있는 가능성을 보여주고 있다. 엔진측정 결과와 차대동력계의 CO₂ 배출결과의 차이는 1.0g/kWh로 0.2% 수준으로 잘 일치함을 알 수 있다.

한편, Table 3의 모드간 배출가스 실험결과를 환산계수를 사용하여 동력단위로 환산한 결과를 Table

Table 5. Comparison of exhaust emission data between measured values and converted ones(WHVC mode)

| 구분 | 차대동력계 | | 엔진동력계 | 차이 |
|-----------------|------------|----------------|----------------|-------|
| | 측정값 (g/km) | 변환값, A (g/kWh) | 측정값, B (g/kWh) | |
| CO | 1.86 | 2.17 | 1.09 | 1.08 |
| THC | 0.36 | 0.43 | 0.035 | 0.395 |
| NOx | 0.07 | 0.09 | 0.22 | -0.13 |
| CO ₂ | 485.7 | 568.2 | 567.2 | 1.0 |

Table 6. Comparison of emission data evaluated from conversion factor based on energy unit

| 구분 | 배출가스 변환값 (g/kWh) | | | | 비고 |
|--------|------------------|------|------|-----------------|---------|
| | CO | THC | NOx | CO ₂ | |
| WHVC | 2.17 | 0.43 | 0.09 | 568.2 | 환산계수 적용 |
| BUSAN | 4.46 | 0.50 | 0.03 | 565.3 | |
| KATECH | 3.84 | 0.50 | 0.0 | 566.3 | |

Table 7. Comparison of CO₂ emission conversion data by mode

| 구분 | 환산계수 | 차대동력계 | | 엔진동력계 | 차이 |
|--------|----------|-------|-------|-----------|------|
| | | 측정값 | 변환값 | 측정값 | |
| | (km/kWh) | g/km | g/kWh | g/kWh | % |
| WHVC | 1.169 | 485.7 | 568.2 | 567.2 | 0.2 |
| BUSAN | 0.806 | 701.0 | 565.3 | (WHVC 모드) | -0.4 |
| KATECH | 0.788 | 718.4 | 566.3 | | -0.2 |

6에 정리하였다. KATECH 모드와 BUSAN모드의 결과를 WHVC모드 결과와 비교할 때 모드간 편차는 상당히 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 모드에 따른 배출가스 성분의 배출특성 차이를 연비와 엔진효율을 고려한 환산계수를 적용하여 변환한 값으로 CO₂의 경우 매우 밀접한 결과를 보여준다.

Table 7에 모드별 CO₂ 측정값과 변환값을 엔진동력계에서 측정된 결과와 비교하였다. 비교결과 측정 모드에 관계없이 엔진동력 단위의 CO₂ 변환값이 0.5% 이내로 일치함을 알 수 있다.

이러한 결과로부터 배출가스 중 중량비율이 높은 CO₂에 대해 환산계수 방법에 의한 단위 변환방법은 차대동력계 결과로부터 엔진동력계 측정단위로 환산하는데 유용한 수단이 될 수 있다고 판단된다. 나아가 차대동력계의 시험모드에 관계없이 단위동력당 CO₂ 배출량(g/kWh)을 차대동력계 측정 결과로부터 정확히 예측할 수 있음을 보여주었다.

Table 8. Sweden CNG bus emission data and energy efficiency⁶⁾

| 구분 | 배출가스 성능(상단: g/km, 하단: g/kWh) | | | | 효율 (%) | 평균 속도 (km/h) |
|---------|------------------------------|------|------|-----------------|--------|--------------|
| | CO | THC | NOx | CO ₂ | | |
| WHVC | 0.06 | 0.42 | 1.46 | 795 | 27 | 40 |
| | 0.07 | 0.47 | 1.62 | 881 | | |
| Haninge | 0.20 | 0.28 | 1.64 | 588 | 44 | 55 |
| | 0.19 | 0.26 | 1.54 | 553 | | |
| FIGE | 0.03 | 0.53 | 0.99 | 660 | 31 | 60 |
| | 0.03 | 0.63 | 1.17 | 779 | | |

Table 9. Comparison of Sweden CNG bus fuel economy and CO₂ emission unit conversion results

| 구분 | 변환계수 (km/kWh) | 연비 (km/N m ³) | CO ₂ 배출량 | |
|---------|---------------|---------------------------|---------------------|-------------|
| | | | 측정값 (g/km) | 변환값 (g/kWh) |
| WHVC | 0.980 | 2.80 | 795 | 779 |
| Haninge | 1.325 | 3.79 | 588 | 779 |
| FIGE | 1.180 | 3.37 | 660 | 778 |

3.2 해외 사례 적용

본 연구결과를 해외의 연구결과와 비교를 위해 스웨덴 AVL에서 발표한 CNG 시내버스의 차대동력계 실험 결과를 Table 8에 보였다. 세 가지 모드 조건에서 배출가스 측정값과 효율 결과이다. 차량의 출시연도는 2010년식으로 EURO5를 만족하는 차량이다. 최대출력은 200kW(260hp)급으로 중대형 차종에 속한다.

Table 8에 표시된 효율은 스웨덴 CNG버스 배출성능 자료에 제시된 결과이다. 배출가스 결과로부터 탄소 평형법으로 연비를 산출하고 발열량과 효율을 적용하면 환산계수가 산출된다. 이때 제시된 효율자료의 타당성을 점검할 수 있으며 제시된 효율 값과 분석한 효율 값이 다소 차이가 있었으며 이는 본 논문의 주제를 벗어나는 관계로 세부적으로 다루지는 않았다.

CO₂ 배출성능 자료에 거리단위와 동력단위 결과가 병행하여 표시 되었으므로 환산계수의 타당성을 확인할 수 있다. 2.3절에서 제안한 단위변환 방법을 적용하여 시험모드가 다른 경우의 배출성능을 CO₂ 성분에 대해 동력단위의 배출량을 산출하여 Table 9에 비교하였다. 이때 환산계수는 FIGE 모드의 엔진 효율을 적용하였으며 서로 다른 모드에서 측정된 CO₂ 배출량으로부터 환산계수를 적용하면 FIGE 모드의 동력단위 결과로 정확하게 산출됨을 알 수 있다. 즉, 모드별 부하 특성이 다르거 엔진 효율이 다른 상황에서 특정 시험모드(여기서는 FIGE모드)의 엔진 효율을 동일하게 적용하면 비교한 바와 같이 WHVC모드와 Haninge모드의 동력단위 CO₂ 배출량이 각각 779/kWh로 FIGE 모드의 결과(778g/kWh)와 0.1% 이내로 일치하는 것을 볼 수 있다. 거리 당 CO₂ 배출성능이 모드에 따라 다르게 측정되었지만 FIGE 모드를 기준으로 한 동력단위 배출성능은 거의 동일한 값으로 산출됨을 알 수 있다.

이와 같은 방법은 실험 자료가 제한적인 경우 활용할 수 있을 뿐만 아니라 제시된 자료의 정확성을 검증하는 측면에서 유용한 수단이 될 수 있을 것으로 판단된다. 이상의 결과를 종합할 때 차대동력계 시험을 통해 수집한 배출가스 성능 중 CO₂ 성능은 시험 모드 종류에 관계없이 엔진 동력 단위로 변환하는 방법이 타당한 것으로 확인되었다. 그러나 CO₂이외의 미량 배출특성을 갖는 CO, NO_x, THC 등은 본 연구에서 제시한 변환 방법으로 한계가 있으며 별도의 방법이 필요하다.

IV. 결론

차대동력계 시험을 통해 수집한 자동차 CO₂ 배출 성능을 거리단위(g/km)에서 동력단위(g/kWh)로 변환하는 방법을 제안하였다. 향후 엔진동력계 시험이 제한이 있을 경우 대안으로 차대동력계 시험을 통해 임의모드의 결과로부터 특정 모드의 동력단위 온실가스 자료를 산출하는 방법으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 이때 엔진효율이 필요하며 임의 회전수와 부하조건에서 측정된 결과가 아니라 특정 시험 모드의 효율을 사용해야 정확도를 높일 수 있다.

이러한 방법을 해외 자료에 적용하여 확인한 결과 CO₂에 대해서 정확하게 예측되었으며 제안된 변환방법이 타당한 것으로 확인되었다. 그러나 CO₂ 이외의 미량 배출특성을 갖는 CO, NO_x, THC 등의 배출성능은 본 연구에서 제시한 변환방법으로 한계가 있으며 별도의 방법이 필요하다.

사용 기호 및 약어

- HCNG: hydrogen(30 vol%) mixed with CNG
- WHVC: 차대동력계 시험모드로 실도로 조건을 상사시킨 모드이며 평균속도는 40km/h
- BUSAN: 부산지역 도로조건을 상사시킨 주행 모드이며 평균속도는 20km/h
- KATECH: 자동차부품연구원에서 제시한 시험모드로 평균속도는 18.6km/h
- Haninge: 스웨덴 스톡홀름지역의 실도로 주행 시험 조건으로 평균속도는 약 55km/h
- FIGE: ETC(European Transient Cycle)모드와 유사한 주행모드로 평균속도는 60km/h

REFERENCES

- [1] MOE Notice "Regulation on inspection and testing procedures automobile production", No 2018-45, (2018)
- [2] Project report, "Performance guideline and post management plan for natural gas conversion vehicles", KOGAS R&D Institute, (2018)
- [3] Final project report, "A Development of Engine and Fueling Station for HCNG Fueled City Bus", Global Top Project of MOE, (2016)
- [4] Test report, "Comparison of Exhaust Emission between CNG and HCNG bus", Zyle Daewoo Bus, (2016)

- [5] Han, J. O., Chae, J. M., and Lee, D. W., "A Study on Fuel Economy Determination of Natural Gas Vehicle Using Carbon Balance Method", *KIGAS*, 21(6), 1-7, (2017)
- [6] AVL MTC report, "Enhanced emission performance and fuel efficiency for HD methane engines", (2014)