

탄소 균형과 1차식에 의한 대체 연료의 공연비 산정법

이재원[†] · 권순태 · 박찬준* · 엄인용*

서울산업대학교 에너지환경 대학원, *서울산업대학교 기계공학과
(2007년 10월 12일 접수, 2009년 2월 13일 수정, 2009년 2월 26일 채택)

Air Fuel Ratio Determination Method for Alternative Fuel Based on Carbon Balance and Linear Equation

Jaewon Lee[†], Soontae Kwon, Chanjun Park*, Inyoung Ohm*

Graduate School of Energy & Environment, Seoul National University of Technology, Seoul, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul, Korea

(Received 12 October 2008, Revised 13 February 2009, Accepted 26 February 2009)

요 약

본 연구에서는 탄소 균형 및 1차식에 의한 공연비 산정방법을 대체연료에 적용하여 그 결과를 비교하였다. 이전의 연구에서는 Eltinge 차트의 확장, 미연탄화수소의 보상 및 다양한 방법으로부터 계산한 결과를 비교하였다. 또한 Eltinge 방법은 현재 공연비를 산정하는 방법 중 가장 일반적인 식이라는 것을 확인하였다. 그러나 최근 지구온난화 방지를 포함하여 환경 보호와 에너지보존에 대한 요구가 증가하면서 내연기관에 대체연료를 사용이 도입되기 시작하면서 이러한 대체연료들에 대한 공연비의 정확한 산정이 필요하게 되었다. 특히, 산소를 포함하는 연료에서는 Eltinge방법을 제외하고 모든 공연비 산정법들이 다시 유도되어야한다. 이 연구에서는 이미 그 정확성이 확인된 탄소균형식을 이용하여 대체연료의 공연비를 산정하기 위해 다시 유도하였고, 각 대체 연료에 실제로 적용이 가능한 1차식을 새로이 제시하였다. 평가 결과, 탄소균형식으로 계산한 공연비는 가솔린 연료와 비교하여 다소 오차가 증가하였지만, 그 정확도는 다양한 대체 연료들에 적용하기에 충분하다는 결론을 얻었다. 또한, 제시된 1차식은 $\lambda=1.2$ 이하에서는 그 정확도가 매우 높았다.

주요어 : Eltinge 차트의 확장, 미연탄화수소의 보상, 공연비

Abstract— This paper is to compare the carbon-balanced and liner air-fuel ratio determination methods for alternative fuels. In the previous work, expansion of Eltinge chart, unburned hydrocarbon compensation, comparison of the results from various methods were discussed. It has been also concluded that Eltinge method might be regarded as the most general equation of AFR determination among the existing ones. In the recent years, however, increasing demand for the environmental preservation, including global warming-up protection, and energy conservation lead to introduce the alternative fuel to the internal combustion engine. Therefore, the exact calculations of AFR for these fuels are needed. Especially, for the fuel that contains oxygen, all AFR calculation equations except Eltinge have to be re-formulated. In this paper, the AFR for alternative fuel were calculated by re-formulated carbon balance, accuracy of which was already confirmed, and linear equations, which are newly proposed by statistical method for each fuel. The results show that AFRs based on carbon balance have a little more error compared with gasoline, however, the accuracy is enough for this formula to apply to various fuel. The proposed linear equation also have excellent accuracy below $\lambda=1.2$.

Key words : expansion of Eltinge chart, unburned hydrocarbon compensation, Air-Fuel Ratio

[†]To whom correspondence should be addressed

Graduate School of Energy & Environment, Seoul National Univ. of Technology, Seoul, Korea

E-mail : jaebul1004@snt.ac.kr

기호설명

- k : 수성가스 반응 상수
 m : 연료 중 수소와 탄소의 원자 비(HCR)
 n : 연료 중 산소와 탄소의 원자 비(OCR)
 M : 분자량
 S_x : 혼합기의 비균질 계수(maldistribution factor)
 λ : 상대 공연비 (Relative Air Fuel Ratio)

하첨자

- C1 : 수정 탄소균형식1로 계산
 C2 : 수정 탄소균형식2로 계산
 El : Eltinge 방법으로 계산
 f : 연료
 a : 공기
 LM : M100을 일차식으로 계산
 LN : 천연가스를 일차식으로 계산
 LL : LPG를 일차식으로 계산

1. 서 론

최근 온실가스 배출량 규제와 같은 환경 문제와 석유 자원의 고갈 문제가 대두되면서 대체 연료에 관한 관심이 계속 확산되고 있고 동시에 그 사용도 증가되는 추세에 있다. 또한 각종 연소 장치에서 탄화 수소계 연료의 공기-연료 혼합비 또는 동력기관에서의 공연비의 결정은 매우 중요한 문제이며, 주요 화석 연료에 대해서는 배기 조성을 측정하여 이를 정확히 산정하는 많은 방법들이 개발되었으나 현재 주목을 받고 있는 대체 연료에 대해서는 아직 정확한 산정법에 대한 논의가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이들 대체 연료의 공연비 계산 문제에 대해 논의하고자 한다.

본 연구의 이전 연구에서는 Eltinge 차트를 확장하여 현재 사용 중인 대부분의 연료에 대해 차트를 구성하였고^{1,2)} 이후 Eltinge의 방법과 Spindt 식^{3,4)}을 상호 비교하여 두 방법 모두 대체연료에도 적용할 수 있음을 확인하여 양자의 완벽한 호환성을 고찰하였다. 이어서 탄소균형식을 포함한 기타의 여러 공연비 계산 방식을 비교하여 탄소 균형으로 유도된 식이 비교적 정확하게 공연비를 계산한다는 것을 확인하였고,⁵⁾ 새로이 제안된 일차식도 적용되는 공연비 구간은 제한적이나 매우 정확한 계산을 행함을 살펴보았다.⁶⁾ 그리고 현재까지 알려진 모든 공연비 산정법 중 Eltinge에 의해 제안된 방법이 가장 정확함을 확인하였다.⁶⁾

본 논문에서는 가솔린을 제외한 주요 대체연료 즉 산

소를 포함하고 있는 알코올계 연료와 주요 가스연료에 대해 Eltinge와 Spindt를 제외한 다른 계산방식들의 특성에 대해 논의하고자 한다. 이전 연구에서 알아본 바와 같이 원래의 탄소균형식^{3,4)}과 산소균형식^{7,8)}은 오차가 매우 커서 비교의 의미가 없으므로 여기서는 가솔린에 대해 비교적 정확한 결과를 보였던 탄소 균형식⁹⁾과 일차식⁹⁾을 대상으로 하였다.

2. 공연비 계산식의 비교

2-1. 배기 조성으로부터 산정

배기 성분으로부터 공연비를 산정하는 방법에는 대표적으로는 Spindt에 의해 제안된 Spindt식이 널리 사용되고 있고 기타 산소(O)나 탄소(C)의 균형에 의해 유도된 식들이 사용되고 있다.^{3,7,10)}

이러한 공연비 계산식들은 혼합기 전체를 균질하다고 가정하고 있으며 과잉산소가 존재하는 한 완전 연소를 한다고 가정하였다. 대부분의 식은 희박 영역에서 CO의 배출을 보상하기 위해 그리고 산소 결핍 상태에서는 CO의 급격한 증가를 보상하기 위해 열해리를 고려한 수성가스 반응상수 K를 도입하여 CO의 배출량을 계산하였다. 이러한 계산 방법들은 대부분 배기성분 중 미연탄화수소(unburned HC)를 고려하고 있고 분석기의 지시치에 오차가 없다면 Spindt 식을 비롯해 널리 사용되는 식들은 비교적 정확하다고 알려져 있다.

그러나 이 식들은 대개 온도의 함수인 수성가스 반응상수를 온도와 무관하게 상수로 취급하고 있고 위에서 언급한 바와 같이 균일한 혼합기 분포를 가정하였기 때문에 실제 연소 시스템 즉 온도의 변화가 존재하고, 기본적으로 균질한 혼합기가 보장되지 않는 상황에서는¹¹⁾ 기본적으로 오차를 포함하고 있을 수밖에 없다. 또한 계측된 배기 성분이 오차 없이 분석되었다고 가정하여 이 값들을 기계적으로 대입하여 사용하므로, 물리적으로 불가능한 배기 조성에 대해 이 식들을 적용하여도 공연비가 계산되기 때문에 배기 조성의 물리적 합리성을 이 식들을 통해 파악하는 것은 불가능하다.¹⁾

2-2. 공연비로부터 배기 조성의 유추

기존의 공연비 계산법과는 달리 Eltinge는 배기조성으로부터 공연비를 산정하지 않고 공연비가 주어졌을 때 배기 조성을 구하는 방법을 제안하였다. 여기서도 열해리 반응에 따른 CO의 추가 발생을 고려하여 반응상수 K를 상수로 가정하였다. 그리고 Eltinge는 혼합기가 불균일하게 분포되었다는 또 하나의 가정을 추가하였는데 즉 주어진 공연비에서 혼합기는 명목상의 공연비(평균 공연비)를 중심으로 가우스(Gauss) 분포를 하고 있다고

가정하였다. 이 가정은 이 방법의 중요한 특징이자 장점인데, 결과적으로 이 가정을 포함시킴으로써 반응상수 K를 변수로 취급하는 효과를 가지게 된다.

이 가정에 따라 일정 공연비에서 한 주어진 분포(Mal-distribution factor 또는 표준편차)에 따라 배기 성분을 계산하면 그 공연비와 혼합기 분포상태를 만족시키는 배기 조성은 오직 한 가지 조합만 존재한다. 결과적으로 배기 성분(Eltinge에서는 O₂, CO₂, CO)과 공연비 그리고 혼합기 분포 상태 중 두 가지가 결정되면 이것을 만족하는 나머지 성분 또는 공연비 등은 단 한 가지 조합만 존재하게 된다. 공연비를 고정하고 분포 상태만 달리함으로써 한 공연비에 대해 물리적으로 가능한 무수한 조합의 배기 조성을 구해 낼 수 있는데 이는 결과적으로 반응상수 K를 변수로 취급하는 것과 정성적으로 동일하다는 것을 이전 연구에서 증명하였다.⁶⁾

2.3. 기준 배기 조성으로 Eltinge 방법 채택의 정당성

Eltinge 방법 외의 공연비 산정법이 측정된 배기 조성을 그대로 인정하는 것에 비해 Eltinge는 공연비 및 혼합기 분포 상태에 따른 배기 조성을 구하였다. Eltinge의 방법에 대한 가장 큰 오해는 그가 단순히 불균일 분포를 고려한 공연비를 계산하였다는 것인데 실제로 Eltinge는 공연비 차트를 작성하였다기보다 공연비와 혼합기 분포에 따른 배기 조성을 구하였다. 공연비로부터 배기 조성을 구하려는 시도는 실험 및 계산을 포함해 여러 가지가 있었지만¹²⁾ 실제 구하는 방법 또는 대상에 따라 큰 차이를 보여주고 있는데 이는 바로 혼합기 분포를 균질하다고 가정하였기 때문에 생긴 결과이다. 즉 Eltinge는 현재까지 알려진 것 중에서 가장 일반적인 방법으로 배기 조성을 계산한 것이고, 이러한 이유로 그 결과는 하나의 그래프로 나타낼 수 없어 차트화 된 것이며, 그 외의 방법은 이중 특수한 경우에 대해 계산한 것이라 할 수 있다. 따라서 연료 조성과 혼합비에 따른 공연비 산정에 대해 논의하기 위해, 이전의 연구에서 언급하였듯이 발생할 수 있는 모든 경우에 대해 배기 데이터를 확보하는 것은 불가능하기 때문에 Eltinge에 의한 배기 조성을 기준으로 하고 미연 혼합기가 존재할 때 그 미연 혼합기만큼 O₂와 CO₂의 농도를 보충하여 그 상기의 여러 식으로 공연비를 계산하고 그 차이를 보충하였다.

2.4. 공연비 계산식의 확장

2.4.1 탄소 균형식의 확장

탄소 균형을 이용한 기존의 공연비 계산식에는 연료에 포함된 산소에 대한 고려가 없으므로 이를 임의의 구성을 갖는 연료로 확장하여 유도하면 아래의 식과 같이 된다.

$$AF_{C1} = \frac{M_a}{M_f} \frac{100}{CO + CO_2 + THC \times 10^{-4}} + \frac{m}{2} - \frac{3}{2}n - \frac{1.8 \times CO}{CO + CO_2} \tag{1}$$

$$AF_{C2} = \frac{100 \frac{M_a}{M_f} - 3.05 \times THC \times 10^{-4}}{CO + CO_2 + THC \times 10^{-4}} + \frac{m}{2} - \frac{3}{2}n - \frac{1.8 \times CO}{CO + CO_2} \tag{2}$$

여기서 m은 연료 중 수소와 탄소의 원자비(HCR : Hydrogen - Carbon Ratio), n은 산소와 탄소의 원자비(OCR : Oxygen-Carbon Ratio), M_a는 공기의 분자량(28.96)이며 M_f는 연료의 분자량이다. 위식을 이용한 공연비 계산에서 M_f = 12.01 + 1.00797m + 31.999n/2를 사용하였다.

2.4.2 일차식의 유도

대체연료의 경우도 일정 공연비 구간에서 HC의 양과 연료의 분포 상태에 관계없이 CO+CO₂+THC의 값과 공연비가 거의 직선적 관계를 가지기 때문에 일정 공연비 까지만 회귀 분석을 하여 일차식으로 유도하였다. 여기서 각 연료의 조성에 따라 이론 공연비, 배기 조성 등이 다르기 때문에 연료에 관계없이 일차식을 도출하는 것은 불가능하다.

그러나 Fig. 1에 나타난 바와 같이 연료의 조성에 관계없이 대략 상대공연비 λ=1.2 이하에서 공연비와 CO+CO₂+THC의 값은 직선적인 관계에 있다. 따라서 모든 연료에 대해 λ=1.2 이하에서만 적용한다는 가정 하에 연료별 로 일차식을 구성하였다.

$$AF_{LM} = 14.19 - 0.52(CO + CO_2 + \frac{THC}{10^4}) \tag{3}$$

$$AF_{LN} = 36.58 - 1.66(CO + CO_2 + \frac{THC}{10^4}) \tag{4}$$

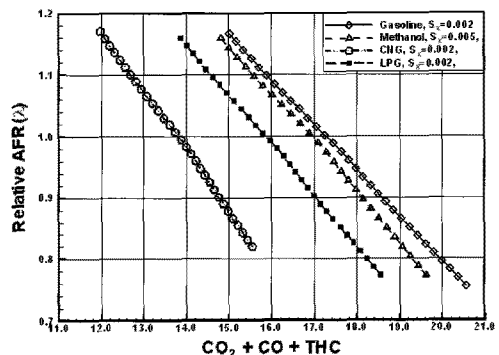


Fig. 1. Relation between AFR and Emissions.

$$AF_{LL} = 33.19 - 1.28(CO + CO_2 + \frac{THC}{10^4}) \quad (5)$$

상기의 (3), (4), (5) 식은 각각 메탄올, 천연가스(NG), 액화석유가스(LPG)에 관한 것이다.

3. 공연비 계산 특성

3-1. 탄소 균형식

3.1.1 메탄올

Fig. 2에 메탄올을 연료를 수정 탄소균형식을 이용하여 공연비를 계산한 결과와 Eltinge 결과를 비교한 그래프를 나타내었다.

탄소균형식을 사용하는 경우도 가솔린에 대해 이 식을 적용한 경우와 마찬가지로 공연비 분포 상태에는 이론공연비 부근의 변화 형태만 약간 다르게 나타날 뿐 거의 영향을 받지 않으나 미연 성분인 HC의 영향은 가솔린보다 다소 많이 나타나는 경향이 있다.

그리고 이론공연비인 6.47을 넘어서면 오차는 안정된 경향을 보이는 것도 가솔린의 경우와 비슷하다. 반면 가솔린의 경우에는 이론공연비 이하에서 공연비를 희박하게 계산하는데 비해 메탄올의 경우는 더 농후하게 계산하는 경향이 있다. 그러나 가솔린에서는 농후할수록 오차가 계속 증가하는데 비해 메탄올의 경우에는 일정한 범위 내로 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 이는 연료 성분에 포함된 산소에 의해 농후한 구간에서 CO와 CO₂ 배출특성에 변동이 발생하여 생긴 오차로 사료된다. 탄소균형식2를 이용하여 메탄올의 공연비를 계산한 결과

가 Fig. 3에 도시되어 있다. 탄소균형식1로 계산한 경우에는 이론 공연비를 지나면서 대체로 공연비와 HC에 관계없이 일정한 차이로 약간 희박하게 계산되며 안정된 모습을 지닌다.

이에 비해 탄소균형식2의 경우는 전체적인 경향은 유사하나 HC의 양에 따라 오차의 크기가 달라지고 THC가 많은 경우 오히려 농후하게 계산됨을 알 수 있다. 이를 정량적으로 비교한 것을 Table 1에 나타내었다.

Table 1에 나타난 바와 같이 탄소균형식1은 대체로 0.7% 이하의 오차를 보이고 안정되어 있으나 탄소균형식2의 경우는 HC의 배출량에 따라 오차가 2%에 달하기도 한다.

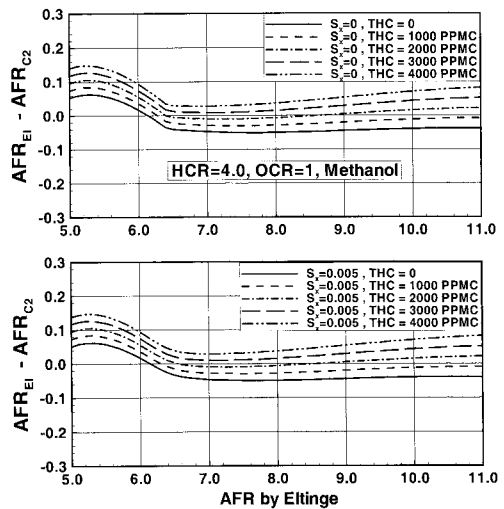


Fig. 3. AFR difference of Eltinge and carbon balance method 2 for methanol(Sx=0.0, 0.005)

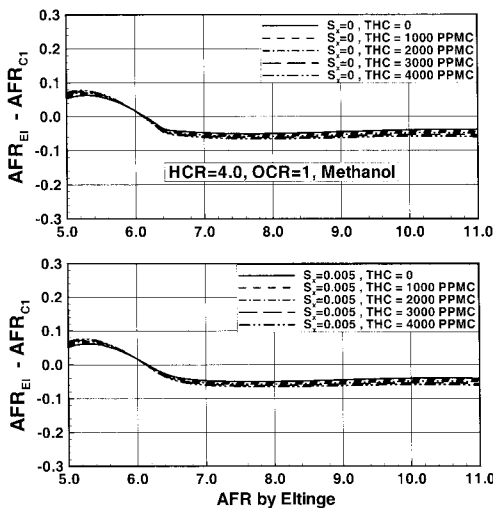


Fig. 2. AFR difference of Eltinge and carbon balance method 1 for methanol(Sx=0.0, 0.005)

Table 1. Comparison of Eltinge and carbon balanced AFR for methanol (Sx=0.005)

Eq.	THC	AF _C	AF _{EI} (λ)	Dev.(%)
Eq. (1)	2000	5.76	5.80 (0.9)	-0.69
		6.51	6.47 (1.0)	0.15
	4000	11.05	11.00 (1.7)	0.45
		5.76	5.80 (0.9)	-0.69
Eq. (2)	2000	6.51	6.47 (1.0)	0.15
		11.06	11.00 (1.7)	0.54
	4000	5.72	5.80 (0.9)	-1.38
		6.47	6.47 (1.0)	0
		10.98	11.00 (1.7)	-0.18
		5.68	5.80 (0.9)	-2.07
4000	6.43	6.47 (1.0)	-0.62	
	10.92	11.00 (1.7)	-0.72	

특히 탄소균형식은 연료 중 산소의 포함 여부에 따라 농후한 영역에서 오차의 발생 방향이 달라진다. 따라서 이론공연비 이하의 농후한 공연비에서 산소를 포함한 연료와 포함하지 않은 연료의 상대 공연비 λ 를 동시에 평가하여 비교할 때는 상당한 주의를 요한다.

3.1.2 가스연료

Fig. 4에 탄소균형식에 의한 천연가스(NG)의 공연비 계산 결과를 도시하였다. 천연가스는 산지에 따라 조성 비율이 다르므로 인도네시아 산(체적비로 메탄 89.91%, 에탄 5.44%, 프로판 3.16% 및 기타 미량 성분으로 구성)을 기준으로 하였다. 이것 역시 공연비 분포의 영향은 관찰되지 않으므로 $S_x=0.002$ 인 경우만 나타내었다. NG의 대체적인 계산 경향은 가솔린의 경우와 일치한다. 즉 이론공연비 이하의 농후한 구간에서는 상당히 희박하게 계산되며 이론 공연비를 지나면서 대체로 안정된 값을 보이지만 HC의 증가에 따라 탄소균형식1은 희박한 방향으로 오차가 증가하고 있으며 탄소균형식2는 오차를 줄이는 방향으로 계산되고 있다. HC 증가에 따라 탄소균형식1보다 탄소균형식2의 오차가 줄어드는 방향으로 진행되는 것은 두 식 모두 전체 공연비 구간에 걸쳐 희박한 방향으로 오차를 지니고 있으나 우연히 탄소균형식2의 오차진행 방향이 절대적 오차를 줄이는 방향으로 진행된 결과에 불과하다고 판단된다. 특이한 것은 가솔린의 경우 HC 값에 따른 탄소균형식1의 상호 오차가 탄소균형식2보다 항상 적었던데 비해 NG의 경우 농후 구간에서는 탄소균형식1의 상호오차가 적고 이론 공연비를 넘어선 희박 구간에서는 탄소균형식2의 상호 오차가 줄어든다.

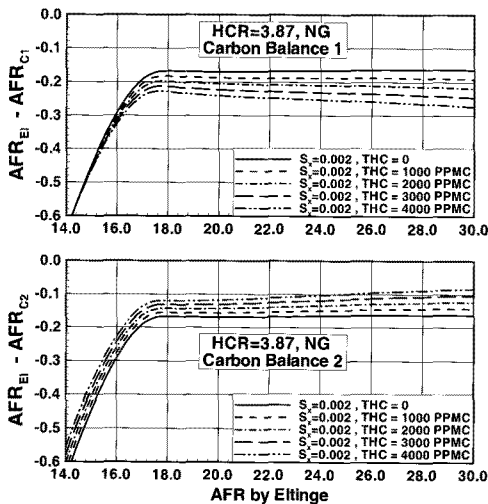


Fig. 4. AFR difference of Eltinge and carbon balance method1, 2 for natural gas($S_x=0.002$)

Fig. 5에 LPG(부탄 70%+프로판 30%)에 대한 계산 결과를 도시하였다. LPG에 두식의 계산 결과는 가솔린과 매우 유사한 경향을 보이고 있다. 자세히 관찰하면 가솔린과 NG의 중간적 성격을 가지고 있다. 이러한 오차 경향은 HCR에 의해 지배되는 것으로 판단된다.

즉 산소가 함유된 메탄올을 제외하고 HCR에 따른 오차의 변화를 가솔린(HCR=1.85), LPG(2.55), NG(3.87)로부터 관찰하면 HCR이 증가할수록 공연비가 희박하게 계산되는 경향이 있다. 이들 계산식의 정량적인 비교를 Table 2에 나타내었다.

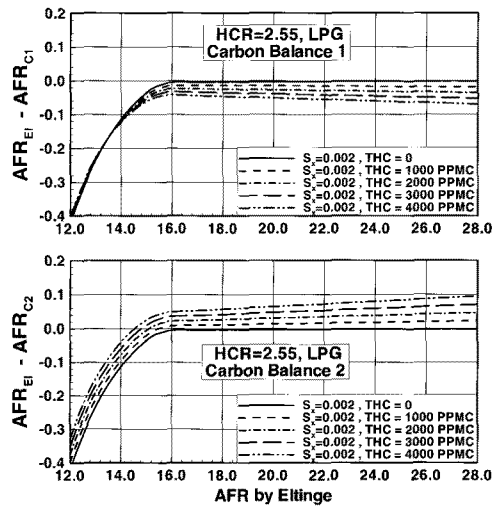


Fig. 5. AFR difference of Eltinge and carbon balance method 1, 2 for LPG($S_x=0.002$)

Table 2. Comparison of Eltinge and carbon balanced AFR for natural gas & LPG ($S_x=0.002$, $THC=2000$ ppmc)

Eq.	Fuel	AF_C	$AF_{Ei}(\lambda)$	Dev.(%)
Eq. (1)	NG	15.79	15.40 (0.9)	2.53
		17.30	17.08 (1.0)	1.28
	LPG	29.22	29.00 (1.7)	0.75
		14.12	14.00 (0.9)	0.86
Eq. (2)	NG	15.55	15.52 (1.0)	0.19
		26.43	26.40 (1.7)	0.11
	LPG	15.74	15.40 (0.9)	2.21
		17.25	17.08 (1.0)	1.00
	NG	29.12	29.00 (1.7)	0.41
		14.08	14.00 (0.9)	0.57
LPG	15.51	15.52 (1.0)	-0.07	
	26.36	26.40 (1.7)	-0.15	

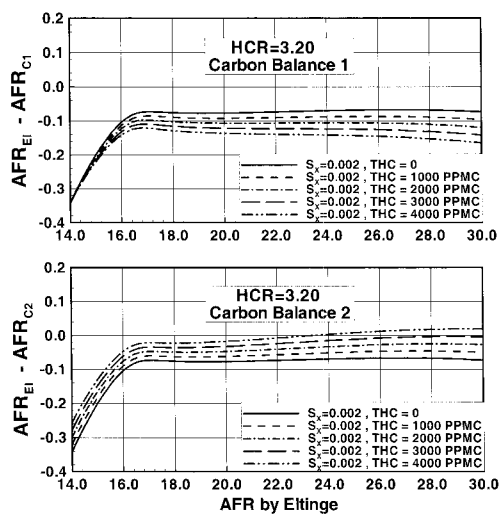


Fig. 6. AFR difference of Eltinge and carbon balance method 1, 2 for arbitrary fuel(Sx=0.002)

Table 2를 통해 비교한 값을 볼 때 HCR이 큰 CNG의 오차가 대체로 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 경향을 확인해 보기 위해 HCR=2.55와 3.87의 중간이 HCR=3.2인 임의의 연료에 대해 배기 조성을 구하고 이를 각각 탄소 균형식1, 2로 공연비를 계산한 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 이 임의의 연료는 NG와 LPG 연료의 공연비 계산 특성의 중간적인 특징을 보여 주고 있음을 확인할 수 있다.

결론적으로 탄소균형식은 모두 이론 공연비 이하의 농후한 공연비에서 오차가 매우 크고 HCR의 증가에 따라 공연비를 희박하게 계산하며 오차도 증가한다.

그러나 HCR 증가에 따라 탄소균형식1은 HC의 영향이 커지는 반면 탄소균형식2는 HCR이 증가하여도 HC의 영향이 거의 일정한 경향을 보여준다.

3-2. 일차식

각 연료에 대한 일차식 (3), (4), (5)를 이용하여 각 연료의 공연비를 계산한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 통계적 기법을 사용하여 나타난 것이니 만큼 이전의 연구에서 논의하였던 가솔린의 경우와 크게 다르지 않음을 알 수 있고 대체로 연료의 조성에 관계없이 λ 값 1.2 이하에서는 매우 정확한 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 Fig. 1에도 나타난 바와 같이 공연비와 배기 조성 중 CO₂, CO, THC의 합은 산소 농도에 관계없이 일정 구간에서 직선적 관계를 나타내기 때문에 발생한 자명한 결과이다. 이 방법을 이용하여 도시된 연료 외의 다른 연료에도 공연비와 배기 조성이 직선적 관계를 가지는 구간을 파악하여 비슷한 식을 유도하여 사용할 수 있을 것이다.

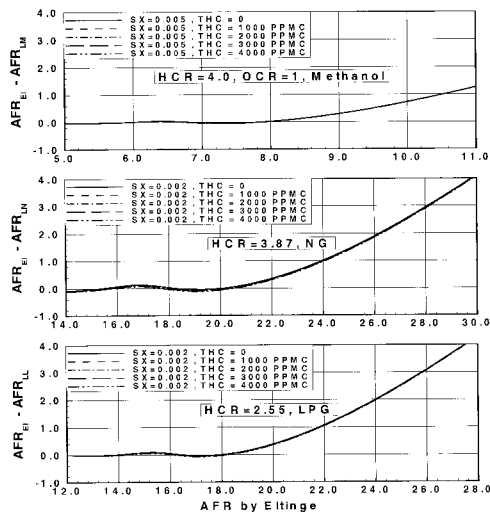


Fig. 7. AFR difference of Eltinge and linear equation for methanol(Sx=0.005), natural gas(Sx=0.002) and LPG (Sx=0.002)

Table 3. Comparison of Eltinge and Linear AFR for Methanol, CNG & LPG(THC=2000 ppmc)

Fuel	AF _L	AF _{EI} (λ)	Dev.(%)
Methanol (Sx=0.005)	5.81	5.80 (0.9)	0.17
	6.44	6.47 (1.0)	0.46
	7.98	8.00(1.24)	0.25
CNG (Sx=0.002)	9.74	11.00 (1.7)	11.5
	15.42	15.40 (0.9)	0.13
	16.96	17.08 (1.0)	0.70
LPG (Sx=0.002)	20.04	20.00(1.17)	0.20
	25.5	29.00 (1.7)	12.7
	23.09	26.40 (1.7)	12.5

이 계산식에 의한 결과를 Table 3에 제시하였다. 특이한 것은 $\lambda < 1.2$ 에서 이론 공연비 부근의 오차가 증가하며 그 점을 제외하면 0.3 %이내의 오차를 갖는다.

5. 결 론

여러 가지의 대체 연료에 대하여 탄소 균형과 일차식으로 유도한 공연비를 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수정된 탄소균형식은 공연비 계산 방식으로 산소를 포함한 연료에 대해서도 Eltinge 및 Spindt 방식과 실용 범위 내에서 0.7%의 오차로 호환 가능하다.
2. 산소가 함유된 연료에 수정된 탄소균형식을 적용하는 경우 다른 연료와는 달리 과농 공연비 구간의 공연비가 농후하게 계산된다.
3. 산소가 포함되지 않은 연료에서 수정된 탄소 균형식은 HCR이 커질수록 그리고 농후할수록 공연비를 희박하게 계산하여 오차가 증가하는 경향이 있다.
4. 수소-탄소의 원자 비 증가에 따라 탄소균형식1은 미연탄화수소의 영향이 커지는 반면 탄소균형식2는 이 비율이 증가하여도 미연탄화수소의 영향이 거의 일정한 경향을 보여준다.
5. $\lambda=1.2$ 이하에서는 $CO+CO_2+THC$ 의 값과 공연비 사이의 직선적 관계가 성립하고 이를 이용해 공연비 산출 공식을 일차식으로 유도할 수 있다.
6. 일차식으로 계산한 공연비는 $\lambda=1.2$ 이하에서는 연료의 조성에 관계없이 정성적으로 안정된 경향을 보여주며 0.3% 이내로 Eltinge 및 Spindt 방식과 호환 가능하다.

참고문헌

1. Lamont Eltinge, "Fuel-Air Ratio and Distribution from Exhaust Gas Composition", SAE Paper 680114 (1968).
2. Inyong Ohm and Chanjun Park, "Determination of Air Fuel Ratio according to Fuel Composition(I) -Eltinge

- Chart as a Reference Exhaust Composition", Transaction of the KSME(B), Vol.27, No.11, pp.1548-1562, (2003).
3. R.S. Spindt, "Air-Fuel Ratio From Exhaust Gas Analysis", SAE paper 650507, (1965).
4. Inyong Ohm and Chanjun Park, "Determination of Air Fuel Ratio according to Fuel Composition(II) -Compensation of Unburned Gas Concentration in Eltinge Chart", Transaction of the KSME(B), Vol.27, No.11, pp.1563-1571, (2003).
5. Inyong Ohm and Chanjun Park, "Determination of Air Fuel Ratio according to Fuel Composition(III) -Comparison of Various Calculation Method", Transaction of the KSME(B), Vol.28, No.10, pp.1147-1154, (2003).
6. Inyong Ohm and Chanjun Park, "Determination of Air Fuel Ratio according to Fuel Composition(IV) -Overall Estimation of Methods", Transaction of the KSME(B), Vol.28, No.10, pp.1155-1162, (2003).
7. Donald L. Stivender, "Development of a Fuel-Based Mass Emission Measurement", SAE paper 710604, (1971).
8. John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, New York, pp.151, (1988).
9. Ono Sokki LTD, "Operating Manual for Engine Test System", Ono Sokki LTD, Tokyo, (1985).
10. L.S. Leonard, "Fuel Distribution by Exhaust Gas Analysis." Paper 379A presented at the summer meeting, St. Louis, Mo., June 5-9, (1961).
11. John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, pp.314, (1988).
12. John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, pp.145-152, (1988).