

연료 조성에 따른 공연비 산정 (Ⅲ)

- 공연비 계산방식간의 상호 비교 -

엄 인 용[†] · 박 찬 준^{*}

(2004년 2월 5일 접수, 2004년 7월 29일 심사완료)

Air Fuel Ratio and Calculation According to Fuel Composition (Ⅲ)

-Comparison of Various Calculation Method-

Inyong Ohm and Chanjun Park

Key Words: Air-Fuel Ratio(공연비), Exhaust Gas(배기 가스), Eltinge Chart(엘팅지 차트), Carbon Balance(탄소 균형), Oxygen Balance(산소 균형)

Abstract

This paper is the third of several companion papers which compare the method of Air-Fuel ratio determination. In the previous works, Eltinge chart was expanded to arbitrary fuel composition as a reference exhaust composition. The compensation of unburned hydrocarbon in Eltinge chart and comparison of Spindt and Eltinge method were also discussed. In addition to Eltinge and Spindt's one, however, there are many methods which calculate Air-Fuel ratio from exhaust emission. Among these methods, carbon balance and oxygen balance are widely used in practice. In some applications, linear formula from statistical method is being used in the field due to its simplicity and convenience. In this paper, these various methods are evaluated and compared with Eltinge results and new linear formula is proposed for the gasoline fuel. The results show that the corrected carbon balance equation has excellent agreement with Eltinge and Spindt's one. On the other hands, the oxygen-balanced formula has a limitation according to the mixture state and AFR. For gasoline fuel, newly proposed linear equation has good compatibility with Eltinge and Spindt up to AFR 17.

———— 기호설명 ————

K : 수성가스 반응상수
 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), 연공비 분포의 표준편차

C : 탄소균형식으로 계산
 C1 : 수정 탄소균형식 1로 계산
 C2 : 수정 탄소균형식 2로 계산
 El : Eltinge 방법으로 계산
 O : 산소균형식으로 계산
 f : 연료
 a : 공기
 L : 일차식으로 계산
 L1 : 수정 일차식으로 계산

하첨자

i : i 화학종

1. 서론

각종 연소시스템에서 공연비의 결정은 매우 중요한 요소이고 따라서 이의 정확하고 빠른 계산을 위해 다양한 방법이 개발되고 사용되고 있다. 계산 방법은 실험의 상황과 기타 여러 요소를 감

[†] 책임저자, 회원, 서울산업대학교 기계공학과

E-mail : iyohm@snut.ac.kr

TEL : (02)970-6311 FAX : (02)949-1458

* 회원, 서울산업대학교 기계공학과

안하여 선택될 수 있으나 그 정확성이 인정되어 현재까지 많이 사용되는 방법은 Eltinge와 Spindt 방법을 제외하고 크게 3가지 범주의 것들이 사용되고 있는데 그것은 탄소 균형에 기초해 유도한 식, 산소 균형에 의해 유도한 식 그리고 배기 조성과 공연비의 관계를 조사하여 통계적 방법으로 결정된 일차식이다. 이전의 연구에서는 주로 Eltinge의 공연비 결정법을 중심으로 이를 여러 연료에 대해 적용해 보았고 미연성분의 보상에 대해 논의하였다.⁽¹⁾ 또한 이를 현재 가장 널리 사용되는 Spindt 방식과 비교하여 그 타당성을 검증하였다.⁽²⁾

한편 분석기와 같은 측정장비를 포함한 실험환경은 모든 경우에 대해 동일하지 않다. 때로는 오차가 큰 공연비 결정 방식을 사용하였더라도 그것이 장기간에 걸쳐 축적된 데이터라면 데이터 베이스의 유지를 위해 오차를 감수하고 기존의 방식을 고수할 수밖에 없는 상황이 발생하기도 한다.

그러나 현재 사용되는 방식들이 여타 다른 공연비 계산과 어느 정도의 차이를 나타내고 있는지를 파악하는 것도 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 현재까지 제안되어 사용되는 여러 공연비 계산식을 비교하여 그 차이에 대해 논의하고자 한다. 본 논문에서는 가솔린(CH_{1.85})에 한정하여 논의를 진행하겠다.

2. 공연비 계산식

2.1 탄소 균형으로 유도된 식

산소의 측정이 불가능한 경우 탄소의 균형(Carbon Balance)에 의한 다음의 식을 사용하여 공연비의 계산이 가능하다.⁽³⁻⁴⁾

$$AF_C = \frac{M_a}{M_f} \left[\frac{100 - CO/2 + 3(H_2O)/2}{CO + CO_2 + THC \times 10^{-4}} - \frac{(H_2O)_a}{CO + CO_2 + THC \times 10^{-4}} + \frac{m}{2} \right] \quad (1)$$

여기서 m은 HCR이며 가솔린의 경우 1.85를 사용하고 M_a는 공기의 분자량으로 28.96을, M_f는 연료의 분자량으로 M_f = 12.011 + 1.00797 × m을 사용한다.

분석기를 통한 물의 양은 측정이 불가능하므로

수성가스 반응상수 K를 도입하여 다음의 식을 이용하여 구한다.

$$H_2O = \frac{m}{2} \frac{CO_2 + CO}{\frac{CO}{K \cdot CO_2} + 1} \quad (2)$$

실제의 경우 상기 식 (1), (2) 대신 식 (3)과 같이 수정된 식이 사용되고 여기에 미연탄화수소(unburned HC)의 보상을 추가하여 식 (4)와 같은 계산식을 사용하기도 한다.⁽⁵⁾

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

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

2.2 산소 균형으로 유도된 식

산소의 균형으로 유도된 식은 탄소균형을 이용한 식과 기원이 같으며 아래의 식과 같다.⁽³⁻⁴⁾

$$AF_O = 4.773 \frac{M_a}{M_f} \frac{CO_2 + CO/2 + (H_2O)/2}{CO + CO_2 + THC \times 10^{-4}} + 4.773 \frac{M_a}{M_f} \frac{NO/2 + NO_2/2 + O_2}{CO + CO_2 + THC \times 10^{-4}} \quad (5)$$

다른 식과는 달리 NO를 포함하고 있는 특징을 가지고 있으며 이는 산소 균형을 이용하기 때문에 나온 결과이다.

2.3 일차식

대부분의 공연비 계산식은 연료의 연소에 대한 화학방정식에서 출발하여 원소들의 질량보존을 이용하여 여기서 계수를 결정하고 이를 중량으로 환산하는 방식을 취하고 있다. 이에 비해 단순히 배기 성분과 공연비 관계를 통계적 기법으로 분석하여 일차식화 하여 사용하는 경우도 있는데 식 (6)이 대표적으로 사용되고 있다.⁽⁵⁾ 산소의 측정이 필요 없고 CO와 CO₂의 일차식으로 되어 있

는 특징이 있다.

$$AF_L = 30.19 - 1.07(CO + CO_2 + \frac{THC}{10^4}) \quad (6)$$

3. 공연비 계산법의 비교

3.1 기준 배기 가스의 선정

이전의 연구에서도 언급하였듯이 발생가능한 모든 경우에 대해 배기 데이터를 확보하는 것은 불가능하기 때문에 Eltinge에 의한 배기조성을 기준으로 하고 미연혼합기가 존재할 때 그 미연혼합기만큼 O₂와 CO₂의 농도를 보상하여 이를 표준 배기조성으로 설정하였다.⁽²⁾ 이어 상기의 여러 식으로 공연비를 계산하고 그 차이점과 특징을 논의하고자 한다. 이전 연구에서 보았듯이 전 실용범위에 걸쳐 Eltinge의 결과와 Spindt의 계산은 0.3% 이내의 차이만 나타내므로 Eltinge의 결과를 실제공연비로 산정하여 논의하기로 한다.

편의상 식 (1), (2)를 탄소균형식, 식 (3)을 수정 탄소균형식1, 식 (4)를 수정 탄소균형식2, 식 (5)를 산소균형식 그리고 식 (6)을 일차식이라 부르기로 한다.

3.2 계산식에 따른 공연비 계산

3.2.1 탄소균형식과 수정 탄소균형식

Fig. 1에 탄소균형식을 사용한 공연비 계산 결과와 Eltinge 결과를 비교한 그래프를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 이 식은 균질혼합기인 경우 이론공연비 이후에는 매우 정확하다. 그러나 공연비의 분포가 비균질할수록 즉 혼합기의 비균질 계수⁽⁶⁾ S_x가 커질수록 허용오차 범위에 들어오는 공연비 범위는 급속히 줄어들고 있음을 알 수 있다. 만일 1%의 허용오차를 적용한다면 S_x=0.004인 경우는 공연비 19 이하 그리고 0.006인 경우는 21 이하에서 허용오차를 만족시키지 못한다. 또한 과농 혼합비에서는 그 오차가 19%에 이르기도 한다. 반면 공연비 계산에 HC는 상대적으로 거의 영향을 주지 않음을 볼 수 있다.

이러한 오차 문제로 현재는 수정 탄소균형식1이 사용되고 있고 이 방법으로 공연비를 계산한 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 이 방법은 그림에 나타난 바와 같이 대체로 공연비 14를 넘어서면 매우 정확한 값을 나타내나 14 이하에서 공연비가 농후해질수록 오차가 계속 증가한다. 그리고 S_x가 공연비의 산정에 영향을 주지 않으나 HC의

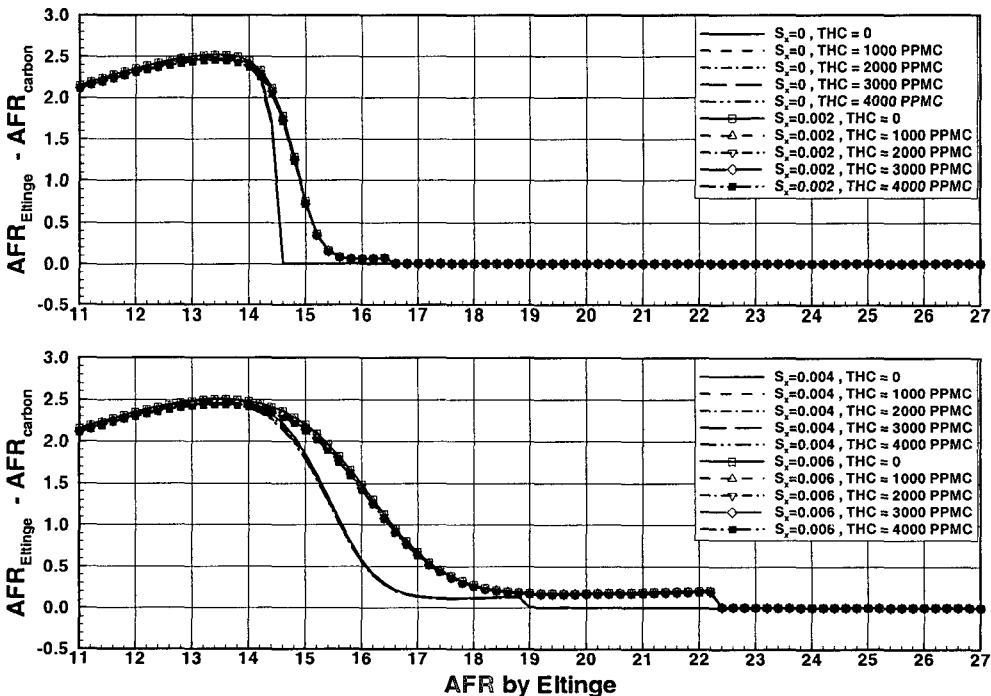


Fig. 1 AFR difference of Eltinge and carbon balance method(S_x=0.0, 0.002, 0.004, 0.006)

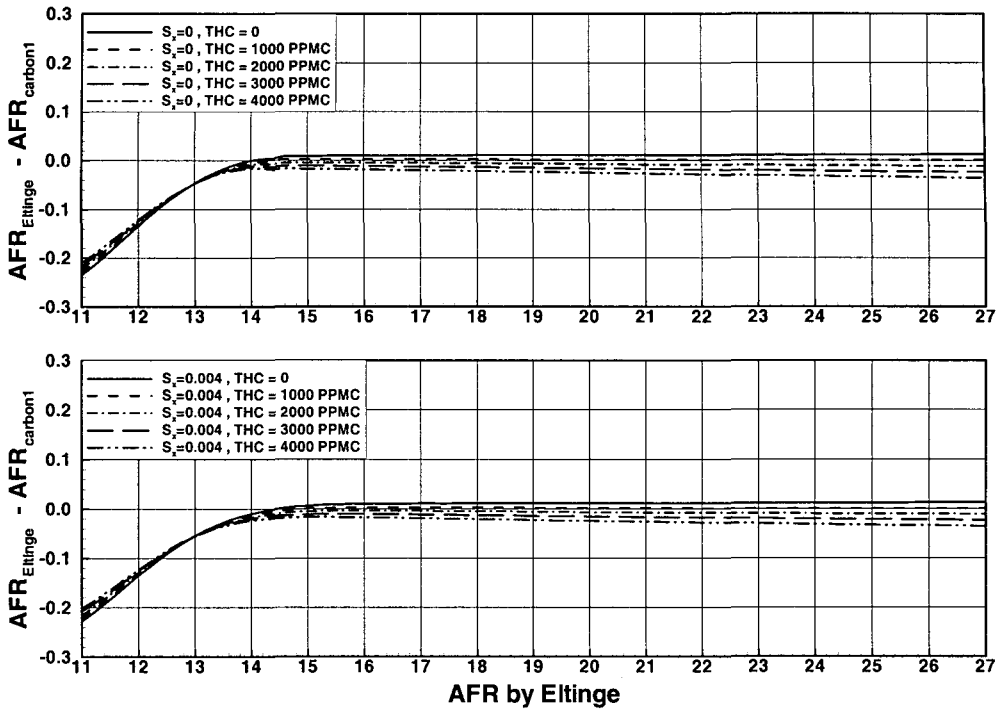


Fig. 2 AFR difference of Eltinge and carbon balance method 1($S_x=0.0, 0.004$)

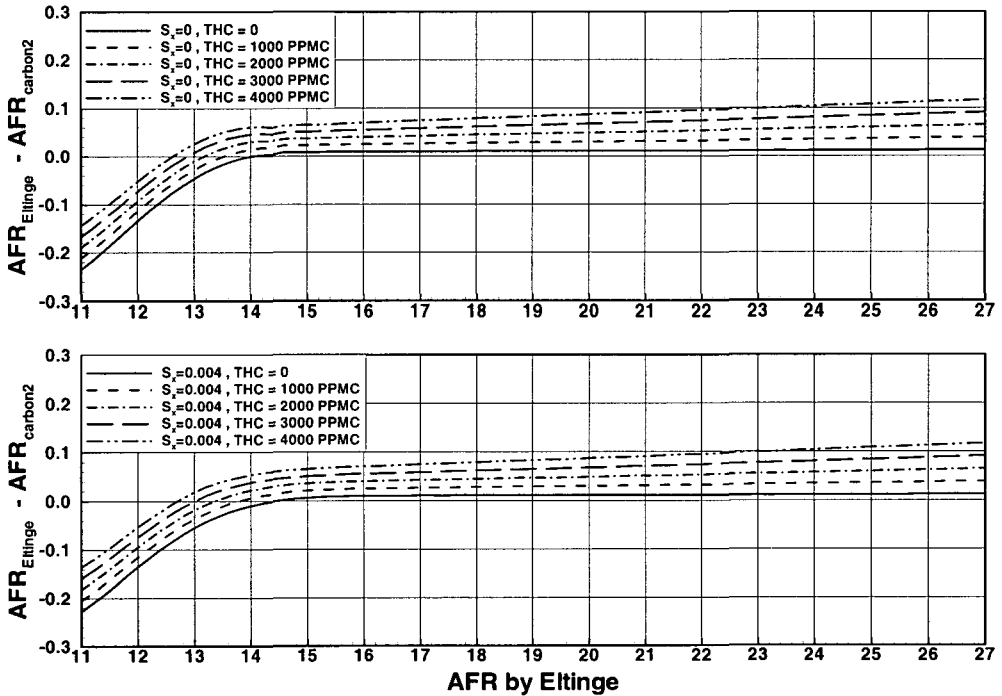


Fig. 3 AFR difference of Eltinge and carbon balance method 2($S_x=0.0, 0.004$)

영향은 약간 나타나고 있다.

수정 탄소균형식 1과 비슷한 것으로 수정 탄소 균형식 2도 사용되고 있는데 이것은 HC의 보상을 약간 달리하는데 그 계산 결과를 Fig. 3에 도시하였다.

이 결과를 보면 수정 탄소균형식1과 유사한 경향을 나타내고 있으며 역시 S_x 의 영향을 받지 않으나 두 가지 차이점이 있음을 알 수 있다.

먼저 수정 탄소균형식 1로 계산한 공연비는 실제 공연비보다 큰 값을 나타내는데 비해 수정 탄소균형식 2의 결과는 더 작은 값을 나타내고 있다. 그리고 HC 보상을 추가했음에도 불구하고 HC 발생에 따른 오차가 수정 탄소균형식 1보다 더 크게 나타난다.

이상의 결과를 최대 발열 공연비 13 부근, 이론혼합비 그리고 희박 영역에 대해 비교하여 그 차이를 Table 1에 나타내었다. 비교는 실제 연소 상황과 비슷하도록 $S_x=0.004$ 의 공연비 조성을 이용하였다. 이전의 연구에서 과농 구간에서 Spindt의 결과는 Eltinge 계산보다 희박한 계산 결과를 나타내었다.⁽²⁾ 이는 Spindt와 탄소균형식은 Eltinge의 계산을 기준으로 한 경우 오차의 방향이 서로

반대라는 의미이다. 따라서 Spindt와 탄소 균형식을 과농 구간에서 적용 비교하면 양자의 차이가 더 크게 발생함을 알 수 있다.

Table 1 Comparison of Eltinge and carbon balanced AFR($S_x=0.004$)

Eq.	THC	AF _C	AF _{EI}	Dev.(%)
Eq. (1)	2000	10.54	13.00	18.9
		12.42	14.60	14.9
		25.00	25.00	0
& (2)	4000	10.57	13.00	18.7
		12.46	14.60	14.6
		25.00	25.00	0
Eq. (3)	2000	13.05	13.00	0.38
		14.61	14.60	0.07
		25.01	25.00	0.04
	4000	13.06	13.00	0.46
		14.62	14.60	0.14
		25.03	25.00	0.12
Eq. (4)	2000	13.02	13.00	0.15
		14.57	14.60	-0.21
		24.94	25.00	-0.24
	4000	12.99	13.00	-0.08
		14.54	14.60	-0.41
		24.89	25.00	-0.44

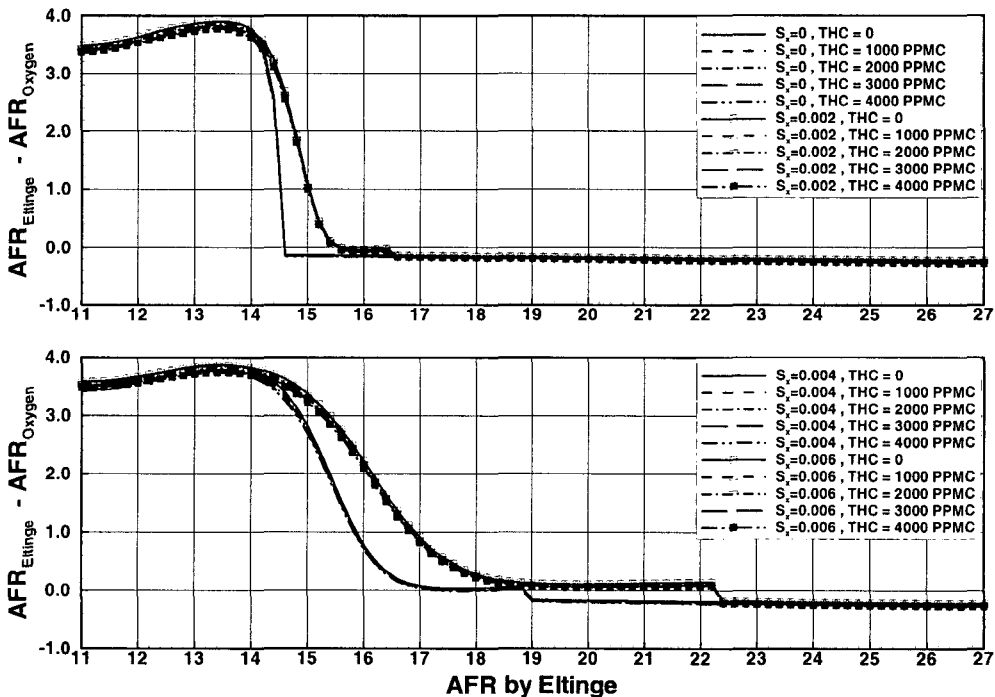


Fig. 4 AFR difference of Eltinge and oxygen balance method($S_x=0.0, 0.002, 0.004, 0.006$)

이상의 결과로 판단해 보면 원래의 탄소균형식만 제외하고 수정식은 모두 실용범위에서 0.5%의 오차범위로 Eltinge와 Spindt의 결과와 호환가능하다. 특히 산소 측정이 불가능한 상황에서도 사용이 가능하다.

3.2.2 산소 균형식

Fig. 4에 산소균형식의 계산 결과를 도시하였다. 이 계산식에는 NOx가 포함되기는 하나 실제 기여는 공연비로 0.1 이하므로 식 전체의 오차에 비해 미미한 수준이다. 따라서 식의 정확도 개선에 실질적 도움을 주지 못하므로 이를 무시하고 계산하여도 무방하다. 여기서는 3000 ppm의 NOx가 발생한다고 가정하여 계산하였다. 산소균형식의 결과는 탄소균형식들과 매우 유사한 경향을 갖는다. 즉 균질혼합기인 경우 이론공연비 이후에는 비교적 정확하지만 공연비의 분포가 불균질할수록 허용오차 범위에 들어오는 공연비 범위는 급속히 줄어들고 있다. 결과적으로 이 식에 의한 계산 결과는 가장 오차가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그리고 탄소균형식은 오차가 항상 양(+)의 값이나 이식은 공연비에 따라 양과 음의 값이 모두 나타나고 있다.

3.2.3 일차식

Fig. 5(a)에 도시된 일차식에 의한 공연비 결정 결과를 보면 공연비 17 이하에서는 실제 공연비와 일정한 차이를 두고 안정된 값을 나타내고 있다. 이 이유를 살펴보면 다음과 같다.

우선 일차식은 공연비가 CO+CO₂+THC와 1차적 관계로 표현되었으므로 Eltinge 방법으로 구한 배기 조성을 이용하여 CO+CO₂+THC와 공연비의 관계를 그려보았는데 이것을 Fig. 6에 도시하였

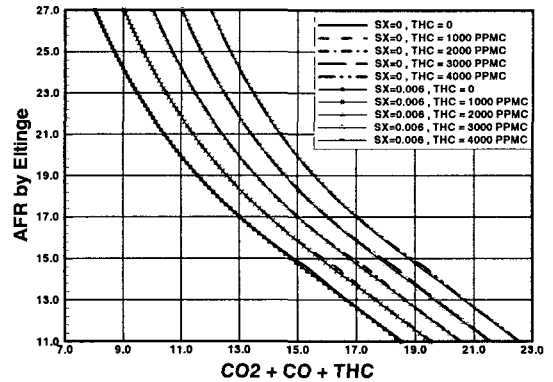


Fig. 6 Relation of AFR and percent value of [CO + CO₂ + THC]

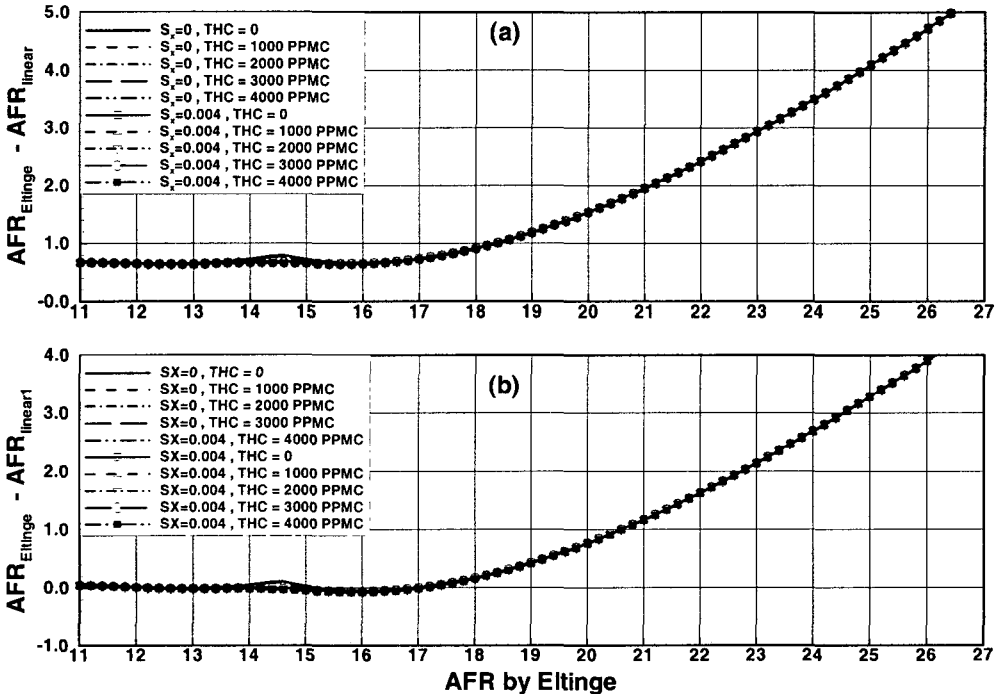


Fig. 5 AFR difference of Eltinge and (a) Linear, (b)Corrected linear(S_x=0.0, 0.004)

Table 2 Comparison of Eltinge and linear equation AFR($S_x=0.004$)

Eq.	THC	AF _L	AF _{EI}	Dev.(%)
Eq. (6)	2000	12.36	13.00	4.92
		13.93	14.60	4.59
		16.27	17.00	4.29
		20.90	25.00	16.4
	4000	12.37	13.00	4.85
		13.95	14.60	4.45
		16.28	17.00	4.24
		20.91	25.00	16.4
Eq. (7)	2000	13.01	13.00	0.08
		14.62	14.60	0.14
		17.01	17.00	0.06
		21.72	25.00	13.1
	4000	13.02	13.00	0.15
		14.63	14.60	0.21
		17.02	17.00	0.12
		21.73	25.00	13.1

다.

그림에서 보듯이 공연비 17까지 CO+CO₂+THC의 값과 공연비는 HC와 S_x에 관계없이 거의 직선적 관계를 가짐을 보여주고 있다. HC는 Y축(공연비 축)의 절편에만 영향을 주고 그 절편의 차이도 공연비 17까지만 회귀분석을 하여 일차식을 유도할 때 기울기의 크기와 정확히 일치한다.

아울러 S_x의 영향은 나타나지 않거나 매우 미미하다. 따라서 이를 바탕으로 CO+CO₂+THC와 공연비의 관계를 회귀 분석하여 식으로 나타내면 다음과 같고 이를 수정 일차식이라 하겠다.

$$AF_{L1} = 31.18 - 1.09(CO + CO_2 + \frac{THC}{10^4}) \quad (7)$$

식 (6)의 1차식은 HCR=1.3근방에서 작업된 것으로 사료되며 어차피 엄밀한 유도과정 없이 통계적 기법으로 유도된 것이니 만큼 수정 일차식을 공연비 17이하에서만 사용한다는 가정 하에 새로운 일차식으로 제안하는 바이다. 또한 공연비 17이상에서도 또 다른 1차 관계가 성립하며 이를 상기의 방식으로 유도할 수 있으나 본 논문에서는 생략하겠다.

수정 일차식을 이용하여 공연비 계산을 한 결과를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 그림에서 보듯이 일차식의 오차가 매우 큰 폭으로 개선되어 있음을 알 수 있다. 이 일차식에서 발생하는 오차를 구

체적으로 수치화하여 이를 Table 2에 나타내었다.

Table에 나타난 바와 같이 공연비 17이하에서 4~5% 정도의 오차를 보여주던 일차식이 수정되면 공연비는 0.2% 이내의 오차로 줄어들을 수 있고 따라서 이를 공연비 17이하의 결정식으로 사용할 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 여러 계산방식에 따라 결정된 공연비는 각각 고유한 특성을 나타내고 있다. 종합하면 산소 균형식과 일차식은 매우 큰 오차를 지니고 있으며, 탄소 균형으로 유도된 식은 보정하여 사용하면 충분히 현재의 Spindt, Eltinge 방식과 호환 가능하고 일차식도 수정식을 사용하면 공연비 17 이하에서는 충분히 정확도를 가진다.

4. 결 론

여러 가지의 공연비 계산식을 Eltinge 계산을 바탕으로 한 배기 조성을 이용하여 그 차이를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 탄소 균형으로 유도된 식은 이론 혼합비보다 농후한 영역의 공연비 결정에서 오차가 크게 증가하여 19%에 달하므로 정확도가 매우 떨어진다.

(2) 탄소 균형으로 유도된 식은 그 특성이 공연비 분포 상태에 매우 민감하며 공연비 분포 상태가 불균일할수록 오차가 증가한다.

(3) 수정된 탄소균형식은 실용 공연비 영역에서 0.5% 이내로 Eltinge 및 Spindt 방식과 호환 가능하다.

(4) 산소의 균형으로 유도된 식은 탄소 균형식과 공연비, 공연비 분포에 따른 오차의 경향은 유사하나 그 크기는 더 크다.

(5) 일차식으로 계산한 공연비는 실제 공연비와는 큰 차이가 나지만 공연비 17 이하에서 정성적으로 매우 안정된 경향을 보여주며 공연비 분포의 영향은 거의 받지 않는다.

(6) 본 연구에서 새롭게 수정된 일차식은 공연비 17 이하의 공연비를 0.2% 오차 내에서 매우 정확히 계산한다.

참고문헌

- (1) Inyong Ohm and Chanjun Park, 2003, "Determination of Air Fuel Ratio According to Fuel Composition(I) -Eltinge Chart as a Reference

- Exhaust Composition," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 27, No. 11, pp. 1548~1562.
- (2) Inyong Ohm and Chanjun Park, 2003, "Determination of Air Fuel Ratio According to Fuel Composition(II) -Compensation of Unburned Gas Concentration in Eltinge Chart," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 27, No. 11, pp. 1563~1571.
- (3) Donald L. Stivender, 1971, "Development of a Fuel-Based Mass Emission Measurement," *SAE paper 710604*.
- (4) John B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw-Hill, New York. p. 151.
- (5) Ono Sokki Ltd, 1985, "Operating Manual for Engine Test System," Ono Sokki Ltd, Tokyo.
- (6) Lamont Eltinge, 1968 "Fuel-Air Ratio and Distribution from Exhaust Gas Composition," *SAE Paper 680114*.