

## 연료 조성에 따른 공연비 산정 (IV) - 공연비 계산방식의 평가-

엄인용<sup>†</sup> · 박찬준<sup>\*</sup>  
(2004년 2월 5일 접수, 2004년 7월 30일 심사완료)

### Determination of Air Fuel Ratio According to Fuel Composition (IV) - Overall Estimation of Methods-

Inyong Ohm and Chanjun Park

**Key Words** : Air-Fuel Ratio(공연비), Eltinge Chart(Eltinge 차트), Exhaust Gas(배기가스), HC Compensation(탄화수소 보상), Thermal Dissociation(열해리)

#### Abstract

This paper is the forth paper of several companion papers which compare the method of Air-Fuel ratio determination. In the previous work, various AFR calculations were performed for various fuels and the results were compared with each other. The comparison, however, were limited to numerical value and estimation of each equation or method was insufficient. In this paper, the overall estimation of the methods was attempted. Also, the method of trouble shooting of instrumentation was presented. Through the estimation of methods, it is concluded that the Eltinge method contains inherently the most perfect thermal dissociation model as far as the exhaust composition is concerned; therefore, this might be regarded as the most general equation of AFR determination among the existing ones. The others might be considered as approximate form. In addition, the mal-distribution factor in Eltinge method is qualitatively equivalent to thermal dissociation chemical equilibrium constant K. Lastly, it is illustrated that all instrumentation error, including the sampling line leakage, can be easily detected through the analyzing the exhaust component on the Eltinge chart.

#### 기호설명

K : 수성가스 반응상수  
m : 연료 중 수소와 탄소의 원자 비(HCR)  
S<sub>x</sub> : 혼합기의 비균질 계수(maldistribution factor), 연공비 분포의 표준편차  
r : calculated by chemical equation

#### 1. 서 론

지금까지 다양한 연료에 대하여 여러 가지 공연

비 계산방법을 사용하여 그 결과를 비교하였다.

모든 계산방식은 나름대로 근거를 가지고 있으며 또한 서로의 장단점이 있다. 예를 들어 탄소균형식의 경우 산소측정 값이 없어도 높은 정확도를 유지하며 공연비를 계산할 수 있고 일차적으로는 공연비 구간의 제한은 있지만 간단히 공연비를 산정할 수 있다.<sup>(1,2)</sup>

본 연구에서는 시종일관 Eltinge의 공연비 계산 결과를 기준으로 하여 모든 공연비 계산법을 비교하고 그 오차에 대해 논하였다. 또한 기준 배기가스로 Eltinge에서 유도한 배기성분을 이용하였고, 모든 비교는 단순히 차이에 대해서 수치만 비교하였다. 따라서 여기서는 기준 배기가스로써 Eltinge의 결과를 사용하는 것에 대한 타당성을 논의하고 아울러 여러 공연비 계산방식에 대해 평가를 해보고자 한다.

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 서울산업대학교 기계공학과

E-mail : iyohm@snu.ac.kr

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

<sup>\*</sup> 회원, 서울산업대학교 기계공학과

## 2. 공연비 계산 방식의 평가

### 2.1 열해리 모델

Eltinge를 포함해 모든 공연비 계산방법은 열해리에 관하여 단순한 가정을 하였다. 즉 식 (1)에 나타난 바와 같이 수성가스 반응모델을 사용하여, 간단한 화학방정식으로는 계산할 수 없는 CO와 H<sub>2</sub>의 발생을 보상하였다.<sup>(3-6)</sup>

$$K = \frac{[CO][H_2O]}{[CO_2][H_2]} = f(T) \quad (1)$$

특히 Eltinge를 제외하고 다른 모든 계산방법은 이 반응 모델을 과농 공연비뿐만 아니라 희박공연비에서 CO의 발생을 보상하기 위해 사용하였다. Eltinge는 이 모델을 과농공연비에서만 적용하였고 희박 영역에서의 CO 발생은 없다고 하였지만 이는 혼합기의 한 요소에 대한 적용이고 전체적으로 희박한 혼합기라도 공연비 분포(S<sub>x</sub>)라는 가정을 통해 과농한 혼합기를 포함하고 있으므로 사실상 희박 영역에서도 열해리를 고려한 것으로 간주될 수 있다.

이들은 모두 평형상수 K를 상수로 가정하여 계산을 하였으나 실제로 평형상수 K는 식 (1)에 나타난 바와 같이 온도의 함수이므로 여기서 실제 공연비(Eltinge 계산에 의한 공연비가 아님)와 오차가 발생하게 된다. Eltinge는 이와 관련하여 다음과 같이 논의하였다. 즉 희박영역에서 열해리에 의해 0.1%정도의 CO 발생이 보고 되었으며, 이 문제를 해결하기 위해서는 반응속도와 동결온도(freezing temperature)를 아는 것이 중요하기는 하나 사실상 이것을 반영하여도 그 값이 S<sub>x</sub>에 미치는 영향은 미미하다. 이를 정밀하게 보상하기를 원하면 희박영역의 계산식에 열해리 모델을 첨가하면 되지만, 이론적으로 완벽한 평형농도를 파악하는 것보다는 배기성분의 영향을 파악하고 이를 통해 정확한 공연비 계산을 유도하는 것이 실제적으로 더욱 중요한 의미를 갖는다.<sup>(3)</sup>

### 2.2 열해리와 공연비 분포의 증가성

열해리에 관련한 Eltinge의 논의는 대체로 수궁할만 하나 몇 가지 중요한 점을 간과하고 있다. 앞서 말한바와 같이 이미 그는 공연비 분포 개념을 통해 희박영역에서도 열해리를 고려하고 있다. 그리고 만일 S<sub>x</sub> 즉 공연비 분포가 반드시 실제 공연비

분포와 일치하여야만 하는 물리적 값이 아니라면 Eltinge는 분포함수의 도입을 통해 열해리의 평형상수 K를 변수의 개념으로 도입하고 있으며 이 K와 S<sub>x</sub>는 정성적으로 등가이다. 이를 논의하면 다음과 같다.

연소반응 시 그 환경에 맞는 평형상수 K가 있고 이에 합당한 열해리가 진행되어 연소생성물이 평형을 이룬 배기성분이 연소실 내에서 생성되고 배출된다고 하자. 또는 평형상태에 이르기 전에 온도가 낮아져 동결되어 배출되어도 무방하다. 그러나 어떠한 경우라도 질량보존에 의해 공연비는 일정하며 또한 화학방정식에서 각 원소의 균형은 만족되어야 한다.

한편 Eltinge의 계산방법에서는 공연비 분포함수를 도입함으로써, 한 공연비에 대해 화학 방정식에서 각 원소의 균형을 만족시키는 물리적으로 타당한 무한대의 배기성분의 조합을 만들어 낼 수 있다. 그리고 분석기로 측정된 배기성분은 이미 어떠한 열해리 상태에서 생성되거나 또는 동결된 것이고 앞서 말한 바와 같이 공연비는 유지되며 화학방정식에서 각 원소의 균형을 만족시켜야 한다. 따라서 배기성분이 Eltinge가 가정한 성분만 존재한다면 주어진 공연비에서 결과물로서의 배기성분은 Eltinge가 만든 무한대의 조합 중의 하나와 일치하지 않을 수 없다.

Eltinge를 포함한 대부분의 공연비 결정방식이 NO<sub>x</sub> 등을 고려하지 않았고 실제 배기에서 생성된 모든 성분을 고려한 것이 아니므로 실제 배기와 Eltinge가 예상한 배기는 정확하게 일치할 수는 없다. 그러나 고려하지 않은 성분이 배기 성분의 농도에 미치는 영향은 미미하므로 근사적으로 매우 정확히 일치할 것이다. 따라서 Eltinge의 열해리 모델이 완벽한 것은 아니지만 그래도 실제에 가장 근접한 모델을 채용하고 있음을 의미한다.

이를 종합하여 농도에 관련해 논의를 국한한다면 공연비의 분포 개념은 정성적으로 열해리 모델을 포함할 수 있는 상위개념이라 할 수 있다. 예를 들어 완전 균질혼합기를 만들어 연소를 시키고 이의 배기 성분을 Eltinge 차트에 그려보았을 때, S<sub>x</sub>가 0이 아니면 그 때의 S<sub>x</sub>는 순수하게 열해리의 정도를 나타낸다고 볼 수 있다. 따라서 Eltinge 차트에서의 S<sub>x</sub>는 공연비 분포의 불균일 정도와 열해리 정도를 더한 어떤 물리적 값이다. 실제 균질혼합기에 가까운 혼합기를 연소시켜 배기조성으로 Eltinge

차트에서 공연비를 결정할 때 농후한 혼합기일수록  $S_x$ 가 크게 나타나고 있음을 쉽게 관찰할 수 있다. 또한 농후한 영역으로 갈수록  $S_x$ 의 간격이 좁아져 이 상황에서 공연비의 작은 변동도 열해리에 크게 영향을 미침을 알 수 있다.

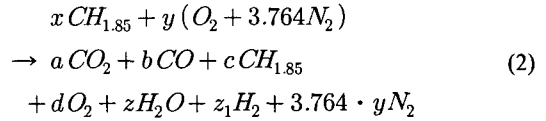
이 논의가 정확하다면 과농혼합기에서 어떠한 상태의 열해리 상태를 가정하여도 한 공연비에 대해 동일한 배기조성의 조합을 얻을 수 있어야 한다. 실제로 확장된 Eltinge 차트의 작성에서 K값을 변화시켜도 결과는 달라지지 않는다.  $K=0$ 은 CO가 없거나 수분이 전혀 발생하지 않은 경우이므로 이는 물리적으로 불가능하다. K값의 차이에 의해 다만  $S_x$ 만 차이가 발생하는 데 이 차이도 크게 나타나지 않는다.

### 2.3 실제 공연비의 비교

위에서 논의한 바와 같이 Eltinge의 방법은 열해리, 공연비 분포가 모두 일반화되어 포함된 공연비 계산의 일반식이라 할 수 있고 이들 개념이 포함되지 않거나 상수로 처리된 기타의 식은 일종의 근사식으로 보아도 무방하다. 이에 따라 Eltinge 차트는 연료의 조성에 관계없이 식을 변형시키지 않고 일관성 있게 계산이 수행되는 반면 여타의 식은 조성에 따라 약간씩의 수정이 요구된다. 이는 현존하는 방식 중 Eltinge의 계산이 실 공연비에 가장 근접한 값을 나타낸다는 의미이며, 이에 대해 실제 배기성분의 예를 통해 확인해 보면 다음과 같다. Table 1은 가솔린을 연료로 하여 시험하면서 배기성분을 측정된 것으로 Table 중 조성 1~4는 전부하 그리고 5~9는 부분부하 조건이다.

이들 배기조성을 기초로 하여 열해리를 고려한 화학방정식을 작성하고 이에 따라 공연비를 계산

해 보도록 한다. 가솔린이 연료일 경우 화학 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.



식 (1)로부터 먼저 수소의 농도를 구하면

$$z_1 = \frac{z \cdot b}{a \cdot K} \quad (3)$$

탄소 균형으로 투입된 총 연료량을 구한다.

$$x = a + b + c \quad (4)$$

수소 균형으로 z 값을 구하고 이를 산소 균형에 대입하면 총 공기량을 구할 수 있다. 즉

$$z = \frac{1.85 \cdot (x - c)}{2 \cdot \left(1 + \frac{b}{a \cdot K}\right)} \quad (5)$$

$$y = a + \frac{b}{2} + d + \frac{z}{2} \quad (6)$$

이를 통해 공연비를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} AF_r &= \frac{y(O_2 + 3.764N_2)}{xCH_{1.85}} \\ &= \frac{y \times (31.999 + 3.764 \times 28.012)}{x \times (12.01 + 1.85 \times 1.008)} \end{aligned} \quad (7)$$

이 식에서 평형상수 K를 결정하기 위하여 온도 범위에 따라 다음의 식을 적용하였다.<sup>(7)</sup>

$$\begin{aligned} \ln(K) &= 2.743 - \frac{1.761 \times 10^3}{T} \\ &\quad - \frac{1.611 \times 10^6}{T^2} + \frac{0.2803 \times 10^9}{T^3} \end{aligned} \quad (8)$$

통상 1250°K 이하에서는 열해리가 발생하지 않는다고 알려져 있고,<sup>(8)</sup> 연소실 내 최고온도가 3000°K를 넘지 않으므로 K값은 1.5~7.0 사이의 값을 갖고, Heywood는 실제 이 범위를 공연비에 따라 1.5~5.5로 보았다.<sup>(9)</sup>

상기의 식 (7)에 식 (8)로 계산한 K값을 온도 범위 1000~3600°K 사이에서 즉 K값을 0.7~8.5 사이로 변경하며 Table 1의 배기조성을 이용하여 공연비를 계산한 결과를 Fig. 1에 도시하였다.

그림에 나타난 바와 같이 K가 커질수록 대체로 공연비는 희박하게 계산됨을 알 수 있다. 그러나

Table 1 Exhaust emission and AFR

	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	THC	AF <sub>Sp</sub>	AF <sub>Cl</sub>	AF <sub>EI</sub>
1	10.62	0.09	7.56	2345	11.61	11.55	11.75
2	11.05	0.08	6.87	2327	11.84	11.77	11.94
3	12.80	0.27	3.71	2580	13.04	13.00	13.02
4	12.94	0.23	3.52	3814	13.00	12.97	12.98
5	14.28	0.77	0.69	1960	14.58	14.64	14.56
6	14.61	0.86	0.35	2184	14.76	14.67	14.75
7	14.64	0.73	0.47	2989	14.55	14.45	14.55
8	10.83	6.04	0.12	1962	19.62	19.67	19.60
9	9.10	8.72	0.11	3686	22.98	22.73	22.95

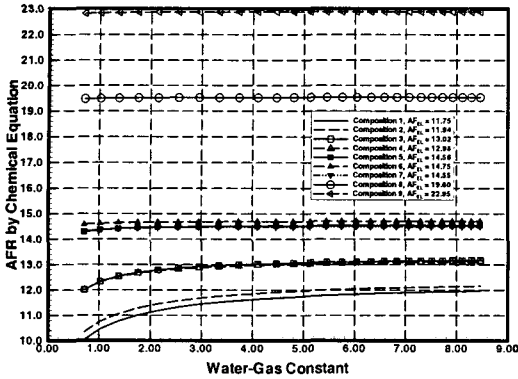


Fig. 1 AFR by chemical equation according to water-gas constant & composition

회박영역에서 K값의 영향은 미미하게 나타나며 최대 오차도 0.3% 이내이므로 열해리가 회박 공연비의 결정에는 영향을 주지 못함을 알 수 있다.

그러나 농후한 공연비로 갈수록 공연비 결정에 미치는 열해리의 영향이 크게 나타나 계산에 사용된 K값의 범위 내에서 약 12% 정도의 차이를 보이고 있으며 K값 2.5~4.5 범위에서는 5% 정도의 차이를 나타낸다.

이 계산에는 NO<sub>x</sub>를 포함하여 기타 미소 반응물이 고려되지 않았으므로 오차를 포함하고 있다. 그러나 NO<sub>x</sub>와 기타 반응물의 발생량은 극히 미량이고 고려를 하여도 분석기 오차 등을 감안하면 실제 정확도에 미치는 영향은 없다고 볼 수 있다. 또한 분석기가 1%의 오차를 허용하고 모든 오차가 공연비 계산 오차를 증가시키는 방향으로 작용한다고 가정하여도 식 (7)에 의한 공연비 오차는 0.05%에 불과하며 기타의 식들도 자체 내에서는 0.5% 이내의 오차를 갖는다.<sup>(10)</sup>

K값이 알려진 상황이라면 식 (7)이 가장 정확하게 실제 공연비에 근접하였고 기타의 식도 자체의 계산에 의해서는 오차가 크지 않으므로 식 (7)에 의한 계산과 다른 공연비 계산법의 결과를 표에 나타난 조성 1, 2에 대해 비교해 보도록 한다.

먼저 Spindt와 탄소 균형의 경우 Fig. 1에 나타나 있듯이 대체로 식 (7)에 의한 계산에서 K=3.5 근방의 값을 지시하고 있음을 알 수 있다. K=3.5는 1740°K에 해당하는 온도이다. 그러나 Eltinge의 계산 결과는 조성 1의 경우 5 근방, 조성 2의 경우 4.5 근방으로 변하고 있어 앞서 논의한 바와 같이 공연비 분포(S<sub>x</sub>)의 도입이 실제의 상황에서는 열해리의 변화로 나타나고 있음을 알 수 있다. 조성 1과 2가 전부하 상황에서 발생한 배기임을 고려하

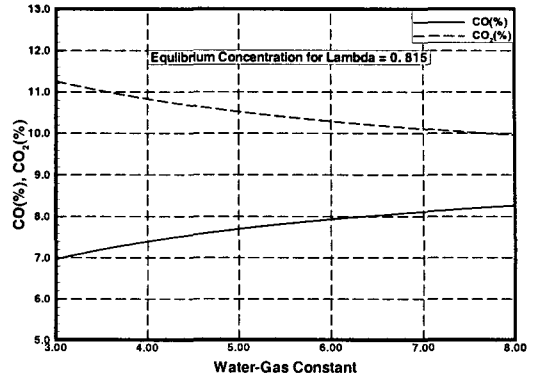


Fig. 2 Equilibrium concentration of CO & CO<sub>2</sub> for λ=0.815 according to water-gas constant

고 이 때 배기가스의 온도가 연소실에서 40cm 정도 떨어진 곳에서 측정되었음에도 약 1050°K 이상을 나타내는 데 이를 이용해 간단히 등 엔트로피 팽창으로 가정하고 계산하여도 연소실 내 온도는 2100°K 정도이며 팽창 중 그리고 포트 및 매니폴드에서의 열전달을 고려하면 이보다 높은 온도일 것이다. 조성 1은 λ=0.815이고 이를 압축비 10에 대해 기연 가스 표와 압축비-공연비에 대한 온도의 그래프를 찾아보면<sup>(11,12)</sup> 약 2600°K 정도인데 열해리를 고려하면 이보다는 약간 낮을 것이다. 이의 확인을 위해 λ=0.815에 대해 K값을 3~8까지 변경시키면서 CO와 CO<sub>2</sub>의 평형농도를 구한 결과를 Fig. 2에 도시하였고 여기서 조성 1은 K=4.7 근방임을 확인하였다. 이때의 온도는 약 2070°K 정도라는 최고 온도가 아니라 동결온도이므로 합리적 범위에 들어오므로 Eltinge로 예측된 K=5(2150°K) 근방과 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 이 경우 식 (7)에 의한 공연비는 K=4.7에 대해 11.72이고 이 값에 가장 근접한 값을 나타내는 Eltinge의 계산이 가장 정확하다고 판단할 수 있다. 공연비 13 근방의 조성 3, 4도 같은 이유로 Eltinge의 계산이 가장 정확하다고 볼 수 있다.

결론적으로 모든 경우에 대한 실제 배기 조성의 데이터를 확보하는 것이 불가능한 상황에서 본 연구에서 Eltinge의 결과를 기준 공연비로 선정할 것은 타당성이 있다.

### 3. 오차의 발생

#### 3.1 열해리

유도 과정이 엄밀하지 못한 산소균형식과 물리

적 근거가 없는 일차식<sup>(13)</sup>을 제외하면 여타 공연비 계산식과 Eltinge 방식 즉 실 배기에 가장 근접한 공연비 사이의 오차는 연료 조성이나 계산 방식에 관계없이 이론혼합비 보다 낮은 과농공연비에서 주로 발생한다. 이는 위에서 논의한 바와 같이 열해리 모델이 완벽하지 못했기 때문이며 따라서 열해리가 활발히 발생하는 과농영역에서 이 차이가 커지는 것은 자명한 결과이다. 심지어 모든 방법 중 가장 정교한 모델을 가진 Eltinge도 과농영역에서는 상당히 큰 오차를 보여 주고 있다. 실제로 Spindt와 Eltinge의 논문에 나타난 결과를 보면 공연비가 과농할수록 계산된 결과와 실제 측정된 결과의 차이가 커짐을 볼 수 있다. 그러나 이것은 공연비 12 이하에서 크게 발생하고 실제 13을 넘어서면 오차 0.2% 이내에서 모든 공연비의 결정이 가능하다.

특이한 것은 탄소균형식의 경우 Eltinge의 조성을 기준으로 하였을 때 과농영역에서 Eltinge에 비해 희박하게 계산되는 경향을 보였는데 실제 배기를 기준으로 할 때 비교한 방법 중 가장 과농하게 계산되는 결과를 보였다. 따라서 열해리에 대한 고려는 탄소 균형식이 가장 취약한 것으로 판단되며 공기량에 속하는 O<sub>2</sub>를 고려하지 않은 점도 오차의 증가에 일정 부분 기여한 것으로 사료된다.

앞서 논의한 바와 같이 희박 영역에서는 열해리의 영향이 줄어들고 이에 따라 모든 계산 방식의 오차가 줄어드는 경향이 있다.

결론적으로 대부분의 오차는 열해리 모델의 불완전성에서 기인한 것으로 판단되며 이론 공연비 보다 훨씬 과농한 구간에서는 비교적 정교한 열해리 모델을 지닌 Eltinge의 결과가 실제에 가장 근접하였다고 판단된다.

### 3.2 HC, NOx의 보상

Eltinge는 HC 보상을 NDIR(non dispersive infra red: 비분산 적외선 검출) 측정치 또는 C<sub>3</sub>를 기초로 한 FID(flame ionization detector: 화염 이온화 검출법) 측정치에 기초를 두었지만 여기에 오차가 있어 결국 Spindt의 식과 비교 할 때 통상 1~2% 최대 3.5%의 오차를 보고하였다. 그는 보정식으로 NDIR 측정의 경우 다음과 같은 식을 사용하였다.<sup>(3)</sup>

$$\overline{O_2} = O_2 - 19.0 \cdot HC \times 10^{-4} \quad (9)$$

여기서 FID 측정의 경우 상기 식의 절반에 해당하는 값을 보정하였다. 그러나 Eltinge가 논의한대로 미연 탄화수소가 C<sub>6</sub>의 헥산(hexane)이라고 해도 위의 식은 오류가 있다. 이 경우 화학방정식을 기초로 이 보정식은 다음과 같이 수정되어야 한다. 즉 O<sub>2</sub>의 보정치는 C<sub>1</sub>을 기준으로 할 때 THC 1 몰당 (1+m/4) 몰의 보정이 필요하므로 C<sub>6</sub>인 경우는 식 (10)과 같이 되어야 한다.

$$\overline{O_2} = O_2 - 9.5 \cdot HC \times 10^{-4} \quad (10)$$

현재와 같이 THC의 개념을 도입하여 C<sub>1</sub>을 기준으로 하고 HCR이 1.85인 경우라면 아래의 식(11)과 같이 되어야한다.

$$\overline{O_2} = O_2 - 1.463 \cdot HC \times 10^{-4} \quad (11)$$

이로 보아 Eltinge는 O<sub>2</sub>의 보상을 약 2배정도 과다하게 행한 것으로 판단되며 이러한 보상의 잘못은 CO<sub>2</sub>로도 이어져 Eltinge는 실제 공연비보다 농후하게 공연비를 계산하였고 Spindt의 계산과도 큰 차이를 나타내기도 하였다.

Methanol, M85와 같이 연료 성분 중 산소를 함유하고 있는 연료도 고려한 좀더 정확한 일반적인 보상은 이전 연구에서도 제시하였는데 이는 다음의 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.<sup>(2)</sup>

$$\overline{O_2} = O_2 - \frac{a}{CUT} \cdot THC \times 10^{-4} \quad (12)$$

$$a = 1 + \frac{m}{4} - \frac{n}{2}, \quad m = HCR, \quad n = OCR$$

실제로 Eltinge의 방식에서 이전 연구에서 고찰한 바와 같이 이러한 보상으로 약 2000 ppmc의 미연 탄화수소에 대해 약 1.5% 정도의 변동된 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 이러한 보상을 한 결과 Spindt와 Eltinge의 계산이 실용 영역에서 매우 정확히 일치함은 보았다.<sup>(2)</sup>

한편 산소 균형의 이외에 모든 계산식은 NOx의 발생에 대해서는 고려하지 않았다. Eltinge는 이를 미연 성분 보상과 같은 방법으로 NO 20000 ppm당 1%의 O<sub>2</sub>를 측정 농도에서 더하여 사용할 것을 제안하였다. Eltinge 뿐만 아니라 모든 계산식에 이를 적용하는 것은 유효하다. 그러나 통상적인 가솔린 엔진의 경우 NOx는 2000 ppm 내외이고 이의 대부분도 NO이다. 미연 HC의 경우 CO<sub>2</sub>와 O<sub>2</sub>에 동시에 영향을 주고 그 크기도 무시할 수 없기 때문에 보

상이 의미가 있다. 그러나 NO<sub>x</sub>에 의한 O<sub>2</sub> 농도 0.1%의 농도 변화는 공연비에 미치는 영향이 미미하여 이를 반영하여도 총 공연비에 0.3%의 변동이 나타나고 또한 0.1%의 농도는 분석기의 측정 오차 범위에 들어가므로 실질적인 보상의 의미가 없다.

#### 4. 공연비의 검증

배기성분의 측정을 위해 사용하는 배기분석기는 특성이 매우 예민한 장비이다. 이로 인해 장시간의 난기(warm-up), 정기적인 보정, 측정 전후의 점검(zero-span)이 필요하며, 또한 지시치의 흔들림(drift)과 복잡한 배관 등에서 누출의 위험이 상존한다. 위의 여러 가지 원인으로 인해 예상치 못한 측정 지시치의 변동이 자주 발생한다. 이러한 상황에서 단순히 공연비의 정확한 결정만을 위해서가 아니라 운전 조건의 정확한 설정과 이에 따른 데이터의 신뢰성 확보를 위해 이 배기지시치들은 물리적으로 타당한 범위에 있는지 점검을 받아야 한다.

Eltinge의 방식에서는 주어진 공연비, S<sub>x</sub>에서 단 한 가지 조합의 배기성분만 존재하는 반면, 다른 공연비 계산식에서는 물리적으로 의미가 없는 값을 대입하여도 이의 진위 여부를 판단할 수 없다.

따라서 이러한 점검은 다른 공연비 계산식으로는 불가능하고 Eltinge 차트를 통해서만 가능하다.

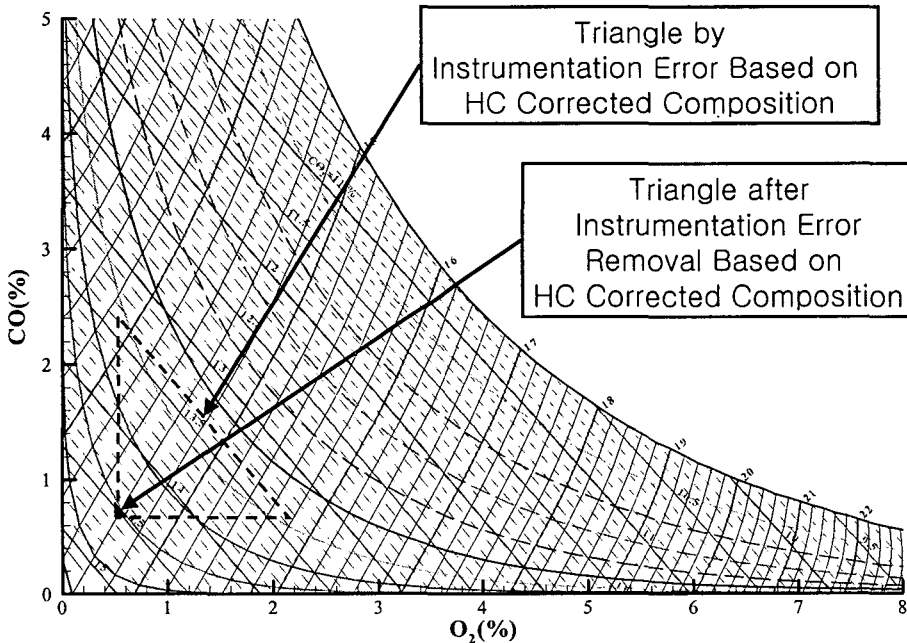
##### 4.1 분석기 자체의 오차

누출 등이 없어도 상기의 여러 원인으로 분석기의 지시치에는 오류가 발생하기도 한다. 실제의 예를 들어보기로 한다. 실제 분석기 사용 중에 CO<sub>2</sub>의 스팬(span)의 변동으로 지시치가 흔들린 원래의 값과 보정된 값을 Table 2에 나타내었다.

이렇게 측정에 오류가 있는 경우에 대해 Spindt는 14.63으로 공연비를 계산하였고 이는 실제 값과 비슷하기는 하나 이는 우연의 일치이다. 실제로 이 부근에서 비슷한 계산 결과를 보여주는 탄소 균형식을 이용하면 공연비는 15.76으로 계산된다. 그러나 어떤 경우라도 공연비는 계산되고 이를 통한 검증은 불가능하다.

**Table 2** Exhaust emission and AFR with/without instrumentation error

	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	THC	AF <sub>Sp</sub>	AF <sub>EI</sub>
W/ Error	13.18	0.81	0.66	1898	14.63	-
W/O Error	14.28	0.77	0.69	1960	14.58	14.57



**Fig. 3** Composition triangle with and without instrumentation error on Eltinge chart

그러나 이 경우 Eltinge 차트를 보면 삼각형이 너무 크고 정 모양이므로 CO<sub>2</sub>가 대폭 적게 측정되었거나 또는 O<sub>2</sub>는 적게 그리고 CO는 과다하게 측정된 경우이고 어떤 경우든 공연비의 판독은 불가능하다. 이를 Fig. 3에 나타내었다. O<sub>2</sub>가 적게 동시에 CO는 과다하게 측정되는 경우는 가능성이 희박하고 CO<sub>2</sub>값이 정확하다면 O<sub>2</sub>는 2.5%, CO는 0.1% 근방일 것이므로 16 근방의 공연비를 가지는데 이러한 가능성도 거의 없으므로 CO<sub>2</sub>가 적게 측정되었음을 쉽게 추론할 수 있다.

이에 따라 분석기의 스파운을 다시 점검하고 재측정한 결과 의미 있는 배기 값을 얻었으며 이를 근거로 한 공연비는 AF<sub>EI</sub>=14.56, AF<sub>Sp</sub>=14.58, AF<sub>CI</sub>=14.64이다.

CO<sub>2</sub> 이외의 다른 성분도 이와 유사한 방법으로 행하여질 수 있다. 또한 동시에 3개의 분석기가 오차의 허용 범위를 벗어나면서 동시에 차트 상에 의미 있는 배기 조성을 나타내는 상황은 거의 발생하지 않을 것이므로 차트의 분석을 통해 분석기의 지시치를 항상 검증할 수 있다.

4.2 누출의 판단

누출의 경우는 실제 공연비를 희박하게 운전하

여 잉여 공기가 연료와 반응을 하지 않고 배출된 경우와 동일한 상황으로 볼 수 있으므로 양자의 배기조성이 열해리의 영향을 제외하면 이론적으로 동일하기 때문에 쉽게 판단이 되지 않는다. 예를 들어 분석기의 채집 과정 중 5%, 10%의 공기 누출이 있는 경우를 가정하고 이를 Table 1의 데이터를 이용하여 다음의 Table 3, 4를 구성하였다.

Table 3의 경우 차트에서 공연비를 찾을 수 있

Table 3 Exhaust emission and AFR with/without air leakage in sampling line for stoichiometric

Leakage	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	THC	AF <sub>Sp</sub>	AF <sub>EI</sub>
0	14.28	0.77	0.69	1960	14.58	14.56
5%	13.60	1.73	0.66	1860	15.27	15.30
10%	12.98	2.61	0.63	1780	15.96	15.95

Table 4 Exhaust emission and AFR with/without air leakage in sampling line for lean AFR

Leakage	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	THC	AF <sub>Sp</sub>	AF <sub>EI</sub>
0	12.01	4.75	0.13	2189	18.05	18.04
5%	11.44	5.52	0.12	2080	18.90	18.88
10%	10.92	6.23	0.12	1990	19.74	19.70

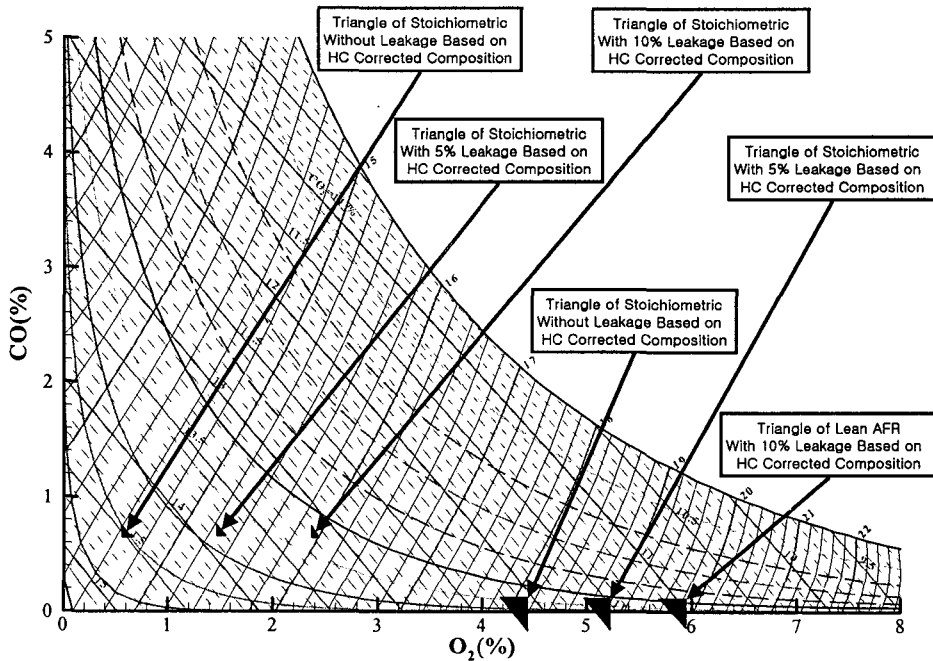


Fig. 4 Composition triangle with and without leakage on Eltinge chart

나 삼각형의 크기나 형태로 지시치의 오류를 찾을 수 없다. 누출에 의해 삼각형의 위치만 바뀌고 크기는 거의 변화가 없다. 다만  $O_2$ 가 2%를 넘어가면 이 때의 공연비는 통상 16 이상이고 이 공연비에서 CO의 농도는 0.1% 근방이므로  $O_2$ 의 농도에 비해 CO의 농도가 지나치게 높으므로 먼저 CO의 분석기를 확인하고 이어 누출 여부를 판단할 수 있다. 이 경우를 Fig. 4에 나타내었다.

Table 4와 같이 회박 공연비에서 누출이 발생한 경우 차트에서 공연비를 찾을 수 있고 역시 삼각형의 크기나 형태로 지시치의 오류를 찾는 것은 불가능하다. 이 경우도 Fig. 4에 나타내었다.

그리고 공연비 16을 넘어서면 CO의 값이 거의 일정하기 때문에 이론공연비나 과농혼합기의 경우와 같이 이를 통한 판단은 어려우며 다만 공연비를 다시 농후한 영역으로 설정하고  $O_2$ 와 CO의 값을 비교하면 누출을 판단할 수 있다.

## 5. 결론

여러 가지 공연비 계산방식에 대해 평가를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Eltinge 방식은 농도 계산에 국한하는 한 현존하는 공연비 계산 방식 중 가장 정교한 열해리 모델을 포함하고 있다. 이때 열해리의 평형상수  $K$ 와 공연비의 비균질도  $S_x$ 는 정성적으로 등가이다.

(2) Eltinge 방식이 가장 정교한 열해리 모델을 포함함으로써 실제 공연비에 가장 근접한 계산을 한다고 판단된다.

(3) 계산 방식에 따라 모두 농후 혼합기 구간에서 오차가 크게 발생하며 이의 대부분은 모두 열해리 모델의 상이에서 발생한다. 열해리는 공연비 계산의 오차를 지배하는 가장 큰 변수이다.

(4) 회박 영역에서는 열해리의 감소로 모든 공연비 계산 방법이 비교적 정확한 값을 산출한다.

(5) Eltinge 계산에서 미연 탄화수소 보상은 의미가 있으나  $NO_x$ 의 보상은 실질적인 의미가 없다.

(6) Eltinge 차트를 이용해 분석기의 이상 여부, 누출 등을 판별할 수 있다.

## 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) Lamont Eltinge, 1968 "Fuel-Air Ratio and Distribution from Exhaust Gas Composition," *SAE Paper 680114*.
- (4) Spindt, R. S., 1965, "Air-Fuel Ratio from Exhaust Gas Analysis," *SAE paper 650507*.
- (5) Donald L. Stivender, 1971, "Development of a Fuel-Based Mass Emission Measurement," *SAE paper 710604*.
- (6) John B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," *McGraw-Hill*, New York, p. 151.
- (7) John B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," *McGraw-Hill*, New York, p. 104.
- (8) Irvin Glassman, 1977, "Combustion," *Academic Press*, New York, p. 6.
- (9) John B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," *McGraw-Hill*, New York, p. 152.
- (10) Wongeun Lee and Inyong Ohm, 2001, "Effects of the Method of Changing Compression Ratio on Engine Performance in an SI Engine," *Transactions of Korea Society of Automotive Engineers*, Vol. 9, No. 4, pp. 27~33.
- (11) John B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," *McGraw-Hill*, New York, p. 121.
- (12) Rogowski, A. R., 1953, Heechul Kim Trans., 1960, "Internal Combustion Engine," *Ministry of Education*, Seoul, p. 82.
- (13) Ono Sokki Ltd, 1985, "Operating Manual for Engine Test System," Ono Sokki Ltd, Tokyo.