

연료 조성에 따른 공연비 산정 (I)

-기준 배기 조성으로서 Eltinge 차트-

엄인용[†] · 박찬준^{*}

(2003년 2월 12일 접수, 2003년 9월 15일 심사완료)

Determination of Air Fuel Ratio according to Fuel Composition (I)

-Eltinge Chart as a Reference Exhaust Composition-

Inyong Ohm and Chanjun Park

Key Words: Air-fuel Ratio(공연비), Exhaust gas(배기 가스), Non-uniformity(비균질성), Eltinge Chart(엘팅지 차트), Exhaust Composition(배기 조성)

Abstract

This paper is the first of several companion papers which compare the methods of Air-fuel ratio determination. There are many methods which calculate Air-Fuel ratio from exhaust emission. Most of them are based on the simple chemical equations, which use balance of atom, and the error of the calculation is negligible as far as the instrumentation accuracy is guaranteed. They assume homogeneous mixture and complete combustion to the extent of oxygen availability. Because of these simple assumptions, they cannot offer the information about the fuel distribution state and the malfunction of instrument. For these limitations, Eltinge offered new one based on stricter mathematical model. This result coincides with the others very well and gives more information about the mixture state and instrumentation. Consequently this might be a general solution for Air-fuel ratio determination and exhaust composition. The objects of the calculation, however, were not commercial fuels except gasoline and the compensation method of unburned hydrocarbon was not appropriate to recent analyzer. Moreover he did not consider the fuel which contains oxygen, such as methanol, ethanol and blend of gasoline-alcohol. In this paper, Eltinge chart is expanded to the arbitrary fuel composition as the reference exhaust compositions for the purpose of further discussions about Air-fuel ratio determination methods and the charts for gasoline, diesel, methanol, M85, liquefied petroleum gas(LPG), natural gas(NG), propane, butane are illustrated.

기호설명

CUT : 건조 공기 1몰 당 총 건조 배기 몰 수
K : 수성 가스 반응 상수
m : 연료 중 수소와 탄소의 원자 비(HCR)

n : 연료 중 산소와 탄소의 원자 비(OCR)
S_x : 혼합기의 비균질 계수(maldistribution factor), 연공비 분포의 표준편차
x : 연공비(fuel-air ratio)
h(x) : 연공비 x에서 건조 공기 1 몰 당 건조 배기 가스 몰 수
Sto. : 이론당량비(stoichiometric)

[†] 책임저자, 회원, 서울산업대학교 기계공학과
E-mail : iyohm@snut.ac.kr
TEL : (02)970-6311 FAX : (02)949-1458

^{*} 서울산업대학교 기계공학과

1. 서론

각종 연소 장치에서 탄화수소계 연료의 공기-연료 혼합비 또는 동력기관에서의 공연비의 결정

은 매우 중요한 문제이지만 이를 정확하게 산정하는 데는 상당한 어려움이 있다. 연소가 연속적으로 일어나는 경우 정상 상태라면 공기와 연료의 질량 유량을 측정하는 것이 가장 원리에 가깝고 정확한 방법이겠지만, 유량의 변화가 크거나 또는 유량 자체가 큰 경우에는 가용한 유량계도 한정되어 있고 또한 그 측정치도 의미 있는 계산을 하기에는 오차가 큰 경우가 많다. 더구나 내연기관과 같이 공기의 공급과 연소가 간헐적으로 일어나는 시스템에서 공기 질량 유량의 정밀 측정 또한 간단히 해결될 수 없다.

한편 대부분의 연소시스템에서 연료의 유량은 공기에 비해 상당히 적기 때문에 이의 정밀 측정은 공기보다 비교적 용이하다. 연료의 유량이 정해지고 배기 성분으로부터 혼합비를 알 수 있다면 이를 이용해 공기의 유량도 역산이 가능하며, 대부분 내연기관에서는 이 연료 유량과 혼합비 또는 공연비를 이용해 공기 유량을 산정한다. 배기 성분의 측정오차가 1% 이내이면 이 방법에 의한 산정은 공연비에 따라 오차 범위 0.1-0.7% 사이로 매우 정확하다.⁽¹⁾

배기조성으로부터 공연비를 산정하기 위해서는 연소반응에 대한 화학방정식을 이용하여 질량보존 법칙에 따라 각 반응물과 생성물의 농도를 구하고 이어 공기와 연료의 몰(mol) 비 또는 질량비를 구하면 된다. 그러나 이 방법을 쓰기 위해서는 공연비에 따라 연소 온도가 달라지고 따라서 열해리의 정도가 달라져 모든 조건에 대해 열해리에 관련된 수성 가스 반응 상수 K(water gas reaction constant)를 알고 있어야 한다. 더구나 상수 K는 실험적으로 결정되기 때문에⁽²⁾ 이 방법에 의한 정확한 공연비의 산정에는 상당한 어려움이 있다.

이를 해결하기 위해 배기가스 조성에 기초한 여러 가지 공연비 산정 방법이 제안되어 사용되고 있으나 각 방법간의 비교와 그 특징 그리고 어떤 방법에 의한 것이 가장 실제의 공연비에 가까운지 즉 기준이 되는 방법이 무엇인지에 대해서는 아직 충분한 논의가 진행되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 현재 널리 사용되는 방법들에 대한 비교와 함께 기준이 될 수 있는 공연비 산정법에 대해 논의하고자 한다. 본 논문에서는 일차적으로 향후 논의의 진행을 위해 본 연구의 기준 방법으로 선정된 Eltinge의 방법에 대

해 알아보고, 이 방법을 현재 상용으로 사용하는 대부분의 연료에 적용하여 공연비에 대한 배기 조성을 구하고자 한다.

2. 공연비 산정법의 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.⁽³⁻⁵⁾

이러한 공연비 계산식들은 혼합기는 균질하게 분포되어 있고 과잉산소가 존재하는 한 완전 연소를 한다고 가정하였다. 대부분의 식은 회박 영역에서 CO의 배출을 보상하기 위해 그리고 산소 결핍 상태에서는 CO의 급격한 증가를 보상하기 위해 열해리를 고려한 수성가스 반응상수를 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 이들 식은 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 상황에서는⁽⁶⁾ 기본적으로 오차를 포함하고 있을 수밖에 없다. 또한 계측된 배기 성분이 오차없이 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.⁽⁷⁾

2.2 공연비로부터 배기 조성의 유추

기존의 공연비 계산법과는 달리 Eltinge는 배기 조성으로부터 공연비를 산정하지 않고 공연비가 주어졌을 때 배기 조성을 구하는 방법을 제안하였다. 여기서도 열해리 반응에 따른 CO의 추가 발생을 고려하여 반응상수 K를 상수로 가정하였다. 그리고 혼합기가 불균일하게 분포되었다는 또 하나의 가정을 추가하였는데 즉 주어진 공연

비에서 혼합기는 명목상의 공연비(평균 공연비)를 중심으로 가우스(Gauss) 분포를 하고 있다고 가정하였다. 이 가정은 이 방법의 중요한 특징이자 장점인데, 결과적으로 이 가정을 포함시킴으로서 반응상수 K를 변수로 취급하는 효과를 가지게 된다.

이 가정에 따라 일정 공연비에서 주어진 하나의 혼합기 분포상태(Maldistribution factor 또는 표준편차)에 따라 배기 성분을 계산하면 그 공연비와 분포상태를 만족시키는 배기 조성은 오직 한 가지 조합만 존재한다. 결과적으로 배기 성분(Eltinge에서는 O_2 , CO_2 , CO)과 공연비 그리고 혼합기 분포 상태 다섯 중 두 가지가 결정되면 이것을 만족하는 나머지 성분 또는 공연비 등은 단 한가지 조합만 존재하게 된다. 공연비를 고정하고 분포 상태만 달리함으로써 한 공연비에 대해 물리적으로 가능한 무수한 조합의 배기 조성을 구해 낼 수 있고 이는 결과적으로 반응 상수 K를 변수로 취급하는 것과 정성적으로 동일하다. 이 동일성에 대해서는 추후 논의하기로 한다.

2.3 기준 배기 조성으로 Eltinge 방법의 일반성

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 있었지만⁸⁾ 실제 구하는 방법 또는 대상에 따라 큰 차이를 보여주고 있는데 그 이유는 혼합기 분포를 균질하다고 가정하였기 때문이다. 즉 Eltinge는 현재까지 알려진 것 중에서 가장 일반적인 방법으로 배기 조성을 계산한 것이고, 그 외의 방법은 이 중 특수한 경우에 대해 계산한 것이라 할 수 있다.

결과적으로 다른 방법들이 배기 조성에 대하여 아무런 정보를 제공하지 못하는 것에 비해 Eltinge 차트에서는 배기 조성의 결정이 우선하고, 공연비 분포 상태를 달리함으로써 물리적으로 가능한 모든 조성을 제시하고 있기 때문에 가장 포괄적인 데이터를 제시하고 있다.

한편 연료 조성과 혼합비에 따른 공연비 산정에 대해 논의하기 위해, 실제로 발생 가능한 모든 경우에 대해 실험적으로 배기 조성을 얻는 것은 불가능하므로, 배기 조성에 대해 물리적으로 가능한 모든 데이터를 제공하는 Eltinge 방법에 의한 조성을 기준으로 삼을 수밖에 없고, 본 논문에서는 향후 논의의 진행을 위해 각종 연료에 대해 Eltinge 차트를 작성하고자 한다.

Eltinge는 석유계 액체 연료만 고려하여 수소 / 탄소비(H/C ratio: HCR) 1.14~2.25에 대하여 차트를 작성하였지만 실제 이들 중 HCR=1.8~2.0 정도만 상용의 연료로 사용되고 있다. 최근 연비 개선과 배기 문제의 대두로 대체 연료에 대한 관심이 높아짐에 따라 본 논문에서는 이를 임의의 조성으로 되어 있는 연료로까지 확장하여 현재 사용되는 대부분의 연료인 가솔린($CH_{1.85}$), 경유($CH_{1.96}$), 메탄올(CH_4O), M85(Methanol 85+ Gasoline15, $CH_{3.39}O_{0.72}$), 천연가스(NG, $CH_{3.87}$), 액화 석유가스(LPG, $CH_{2.55}$), 프로판(C_3H_8), 부탄(C_4H_{10}) 등에 대해 차트를 작성하였다. 여기서 LPG의 경우 부탄과 프로판의 혼합비를 7:3으로 가정하여 계산하였다.

3. Eltinge 방법에 따른 배기 조성의 계산

3.1 가정 및 방법

Eltinge 방법에 의해 공연비와 혼합기 분포 상태에 따른 배기 조성의 계산은 다음과 같은 가정과 순서에 따라 행한다.

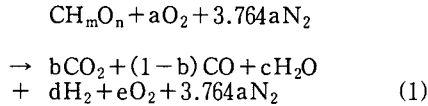
1. 전체 혼합기는 각각 서로 다른 공연비를 가진 미세한 혼합기의 요소로 구성되어 있다.
2. 각 혼합기 요소에 대해 화학 방정식에 따른 연소 생성물을 계산한다. 이 때 산소가 충분하면 각 요소는 완전 연소를 하고 부족하면 수성가스 반응 모델에 의해 H_2 , CO , H_2O , CO_2 는 평형을 이룬다.
3. 공연비 분포함수를 도입한다. 이는 기통간 변화 또는 동일 기통 내 혼합기 분포의 변화를 고려한 것이다.
4. 전체 공연비 스펙트럼에 걸쳐 그 분포를 함수적으로 표현하고 특정 요소의 각 공연비에서 배기 조성을 결정한다. 그 후 각 성분을 전체 공연비 스펙트럼에 걸쳐 적분하여 총 공연비에서 배기 성분을 구한다.

5. 위에서 구한 배기 조성으로 차트를 작성한다.

3.2 임의 조성 연료의 연소 화학방정식

일반적으로 탄화수소계 또는 알콜계 연료는 탄소(C), 수소(H), 산소(O)로 구성되어 있고 단일 성분의 연료가 아닌 한 그 성분이 매우 다양하므로 이를 정확하게 화학식으로 나타내는 것은 불가능하다. 따라서 이를 탄소의 수에 대한 기타 성분의 비로 나타내어 일반적으로 CH_mO_n 의 형식으로 표현하고 모든 공연비의 계산에도 이러한 화학식을 사용하고 있다.

원래 Eltinge는 연료 중에 포함된 산소에 대한 고려를 하지 않았는데 본 연구에서는 그의 방법을 근간으로 산소를 포함한 임의 조성 연료로 확장하기 위하여 아래와 같이 화학방정식을 수정하여 사용하였다.



m : H/C Ratio
 n : O/C Ratio

3.3 미소 요소에서 건조 배기 물 수의 결정

각 배기 성분의 농도는 수분을 제외한 전체 배기에서 각 성분의 부피비 또는 몰(mol) 비이므로 먼저 혼합기가 연소되었을 때 총 배기의 물 수를 계산해야한다. 총 배기 물 수를 구하기 위하여 우선 혼합기가 균일하게 분포되어 있다고 가정할 수 있는 미소 혼합기 요소에서 건조공기 1몰 당 배기의 물 수를 구한다. 여기서 x 를 질량비로 나타낸 연공비(F/A: fuel-air ratio)로 $h(x)$ 를 건조공기 1몰 당 건조 배기가스 물 수로 정의한다.

3.3.1 이론 공연비에서의 건조 배기 물 수

이론 공연비에서 연료가 완전 연소되어 미연 성분이 없다면 CO와 H₂, O₂가 배기 성분 없으므로

$$1 - b = 0, \quad d = 0, \quad e = 0 \quad (2)$$

이며 (1)과 (2)에서 질량 보존에 의해

$$O_2 : n + 2a = 2b + (1-b) + c + 2e$$

$$H : m = 2c + 2d$$

따라서 (3)

$$a = 1 - \frac{1}{2}n + \frac{1}{4}m$$

$$b = 1, \quad c = \frac{1}{2}m$$

이때 이론공연비와 건조 배기 물 수는

$$x_{sto} = \frac{CH_mO_n}{aO_2 + 3.764aN_2} = \frac{12.011 + 1.00797m + 15.99n}{(1 - \frac{1}{2}n + \frac{1}{4}m) \cdot (31.98 + 3.764 \cdot 28.65)} \quad (4)$$

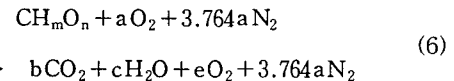
$$h(x_{sto}) = \frac{[CO_2] + [N_2]}{[O_2] + [N_2]} = \frac{1 + 3.764(1 - 1/2n + 1/4m)}{(1 - \frac{1}{2}n + \frac{1}{4}m) \cdot 4.764} \quad (5)$$

3.3.2 희박 공연비에서 건조 배기 물 수

혼합기의 공연비에 따라 다음과 같이 가정한다.

$$x < Sto. \text{ 일 때 } CO = 0.0, H_2 = 0.0$$

$$x > Sto. \text{ 일 때 } O_2 = 0.0$$



따라서 희박영역에서는 다음과 같다.

$$C : b = 1$$

$$H : m = 2c$$

$$O : n + 2a = 2b + c + 2e \quad (7)$$

$$b = 1, \quad c = \frac{m}{2}, \quad e = \frac{n}{2} - \frac{m}{4} + a - 1$$

$$h(x) = \frac{b + e + 3.764a}{4.764a} = 1 + \frac{n/2 - m/4}{4.764a} \quad (8)$$

여기서 건조 배기 물 비가 공연비로 표현되지 못하였으므로 a (공기량)와 x (연공비)의 관계식을 사용한다.

$$x = \frac{12.011 + 1.00797m + 15.99n}{31.98a + 3.764 \cdot 28.165a} = \frac{12.011 + 1.00797m + 15.99n}{138.01a} \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)에서

$$h(x) = 1 + \frac{(n/2 - m/4) \cdot 138.01x}{4.764(12.011 + 1.00797m + 15.99n)} \quad (10)$$

3.3.3 과농 공연비에서 건조 배기 몰 수

식 (1)에서 배기 중 산소는 없으므로 $e=0$ 이고

$$\begin{aligned} H : m &= 2(c+d) \\ O : n + 2a &= 2b + (1-b) + c \\ C : 1 &= b + (1-b) \end{aligned} \quad (11)$$

수성가스 반응 상수를 K라 하면

$$K = \frac{[CO][H_2O]}{[CO_2][H_2]} = \frac{(1-b) \cdot c}{b \cdot d} \quad (12)$$

이때 K 값은 3.5로 한다.⁽⁷⁾ 식 (11)과 식 (12)에서 $R = 2a + n - 1$ 로 두면

$$c = R - b \quad (A)$$

$$d = \frac{n}{2} - c \quad (B)$$

(A), (B)를 식 (12)에 대입하면

$$\begin{aligned} (K-1) \cdot b^2 \\ + [(m/2 - R) \cdot K + (R+1)] \cdot b - R = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 다음과 같이 변수를 정의하여 2차 방정식의 해를 구한다.

$$\begin{aligned} A1 &= K - 1 \\ A2 &= \left(\frac{m}{2} - R\right) \cdot K + (R + 1) \\ A3 &= -R \end{aligned}$$

그러면 식 (13)은

$$A1 \cdot b^2 + A2 \cdot b + A3 = 0$$

$$\begin{aligned} b &= \frac{-A2 \pm \sqrt{A2^2 - 4 \cdot A1 \cdot A3}}{2 \cdot A1} \\ c &= R - b \\ d &= \frac{m}{2} + b - R \end{aligned} \quad (14)$$

(14)에서 b, c, d는 모두 농도 값이므로 $b > 0$, $c > 0$, $d > 0$ 을 모두 만족하는 b 값을 취하여 c, d 값을 결정한 후 건조 배기 몰 수를 공기량으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h(a) &= \frac{b + (1-b) + d + 3.764a}{4.764a} \\ &= \frac{1 + d + 3.764a}{4.764a} \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)에 (14)와 식 (9)를 대입하여 h(x)를 구한 후 과농 혼합비에서의 공기 과잉률 $0.8 \leq \lambda \leq 1$, 즉 $1 \leq x \leq 1.25$ 에서 x값에 따른 h(x)를 몇 개 구한다. 그리고 h(x)를 x에 대한 2차식으로 가정하고 최소 면적법을 이용하여 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$h(x) = A_1x^2 + A_2x + A_3 \quad (16)$$

이후의 과정은 Eltinge의 방법과 동일하며 Appendix에 그 과정을 나타내었다.

4. 연료 조성에 따른 공연비 Chart

4.1 차트의 구성 및 판독법

Fig. 1~Fig. 8에 위에서 언급한 각 연료에 대해 공연비와 혼합기 분포 그리고 배기 조성의 관계를 나타내는 Eltinge 차트를 도시하였다. 차트는 기본적으로 CO를 y축으로 그리고 O₂를 x축으로 하여 주어진 CO, O₂ 농도에 대해 거기에 해당하는 CO₂, S_x(maldistribution factor, 또는 fuel-air ratio의 표준편차) 및 공연비를 도시한 것이다.

S_x는 연공비의 표준 편차로 이 값이 클수록 혼합기의 비균질성은 크다는 것을 의미한다. x축과 y축 상의 조성은 완전 균일한 혼합기 상태에서 열해리가 없는 경우에 해당하며 원점에서 출발하여 동일 공연비 선을 따르는 조성은 이론 혼합비에서의 조성들이다. 또한 동일 공연비 곡선 상의 배기 조성은 각각 혼합기의 분포 상태가 다른 경우들에 대한 배기 조성을 나타낸다. 이것은 공연비가 주어졌을 때 배기 조성은 이 선상에 위치한 조성만 물리적으로 가능하다는 것을 의미한다.

차트를 이용해 공연비를 결정하는 방법은 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 분석기 등을 통해 읽은 배기 값을 이용해 O₂, CO, CO₂가 이루는 삼각형의 중심에 해당하는 공연비 값을 읽으면 된다.

그림의 예는 CO₂ 14.20%, O₂ 0.83%, CO 0.64%, 그리고 HC 2050 ppmc의 분석기 지시치에 대한 것이며 약 14.85 정도의 공연비를 나타내고 있다. 이 조성을 미연성분까지 고려하는 Spindt 식에 적용하면 14.64가 나와서 약 1.3%정도 오차가 있는데, 만일 미연 성분을 보상하면 그 오차는 크게 줄어든다. 미연 성분 보상에 대한 자세한 논의는 후속 논문에서 논의하겠다.

통상적으로 대부분의 분석기가 1% 정도의 오차

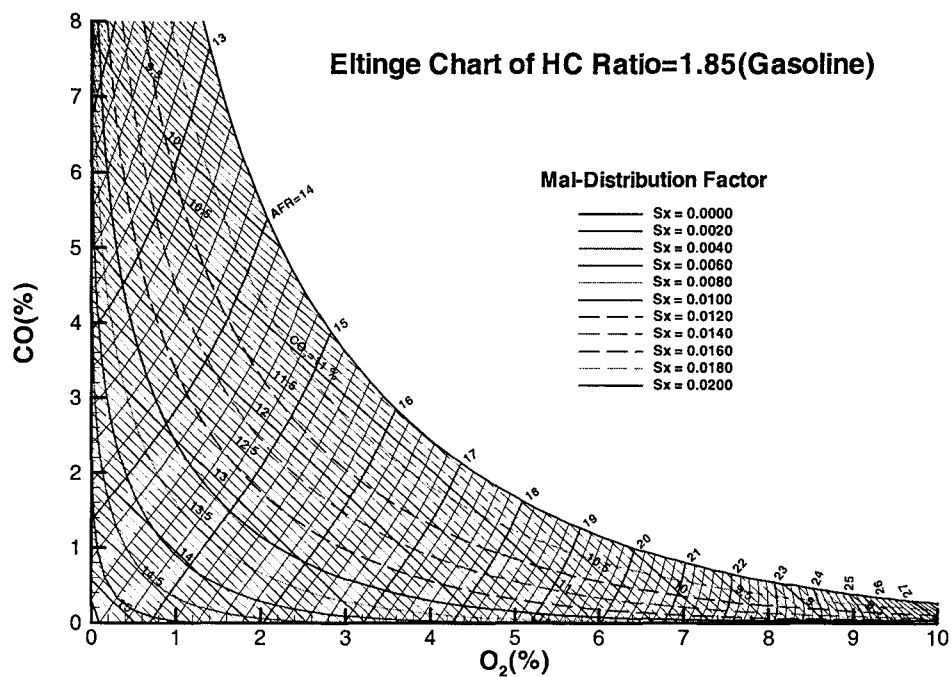


Fig. 1 Eltinge Chart for Gasoline(H/C Ratio=1.85)

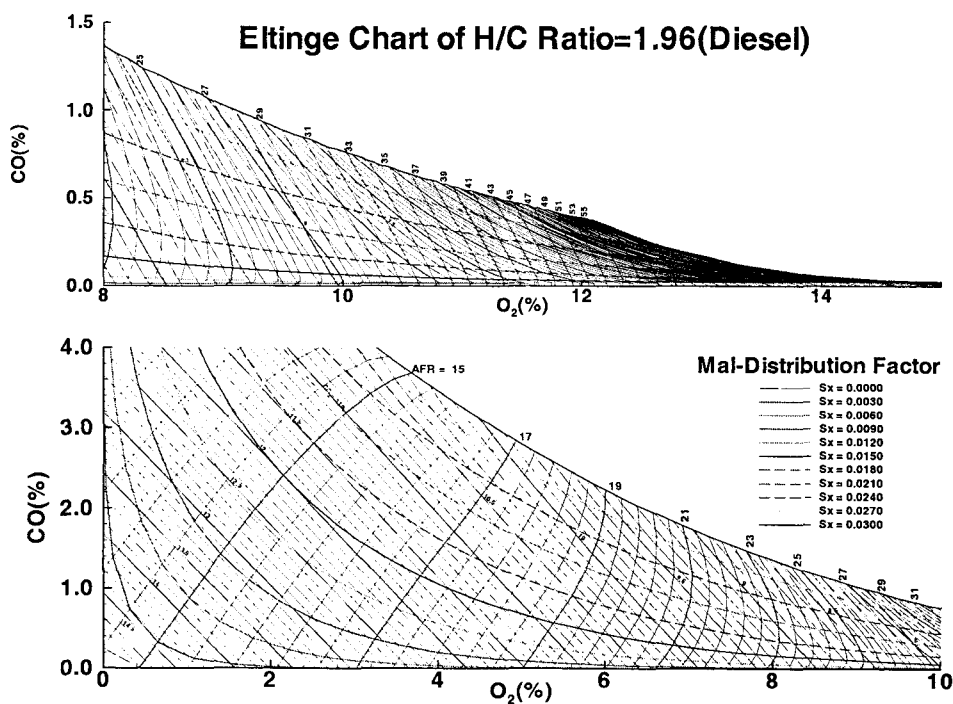


Fig. 2 Eltinge Chart for Diesel(H/C Ratio=1.96)

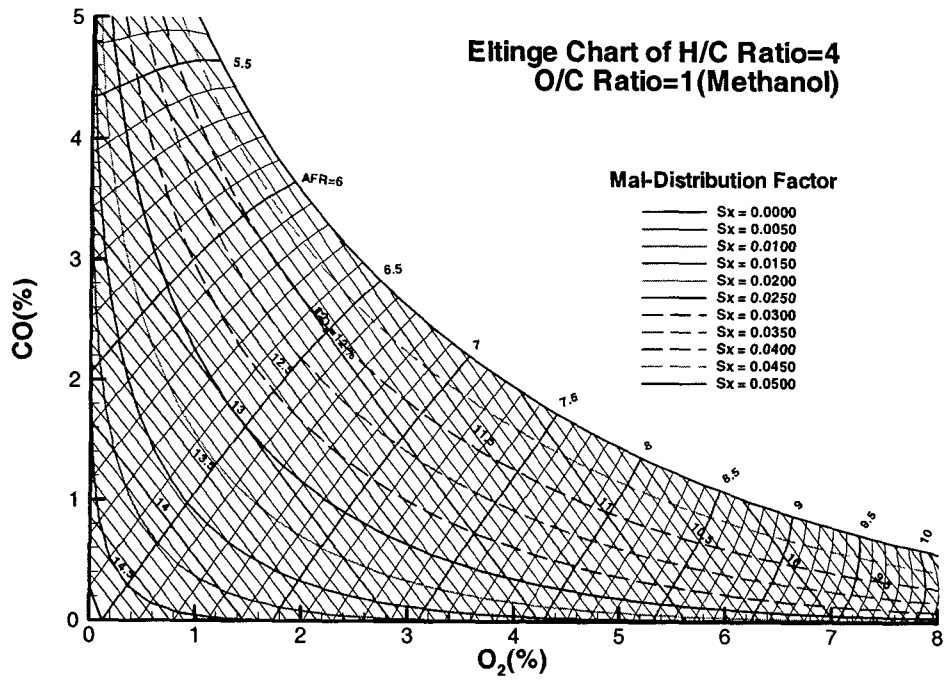


Fig. 3 Eltine Chart for Methanol (H/C Ratio=4.0, O/C Ratio=1)

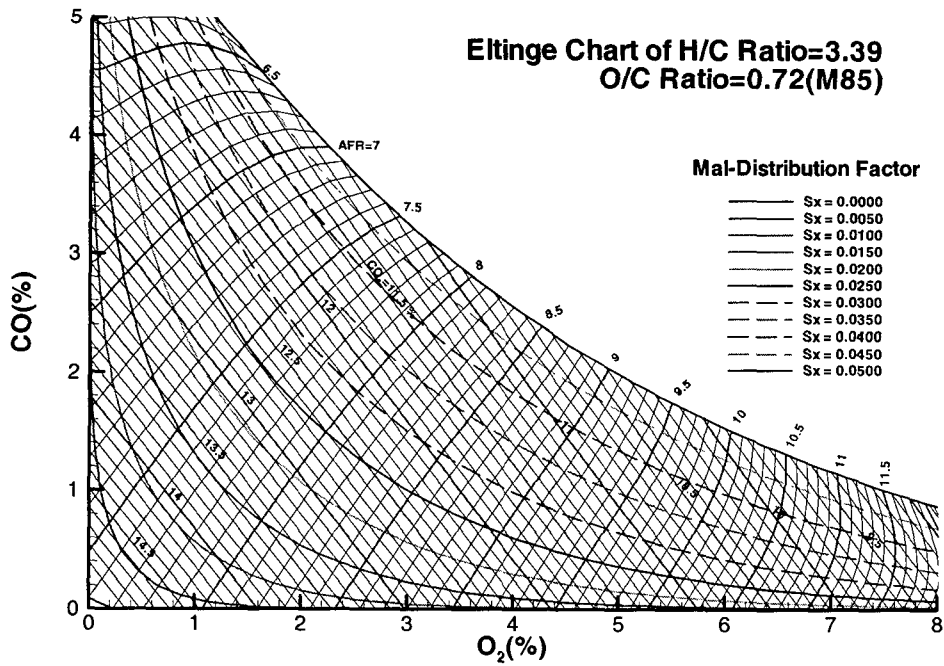


Fig. 4 Eltine Chart for M85 (H/C Ratio=3.39, O/C Ratio=0.72)

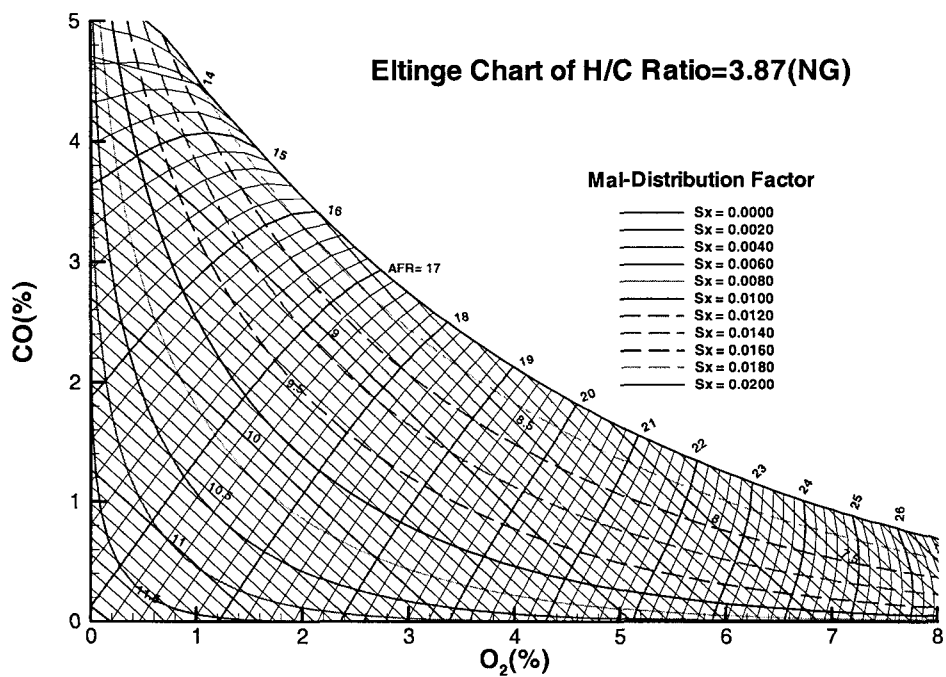


Fig. 5 Eltinge Chart for NG(H/C Ratio=3.87)

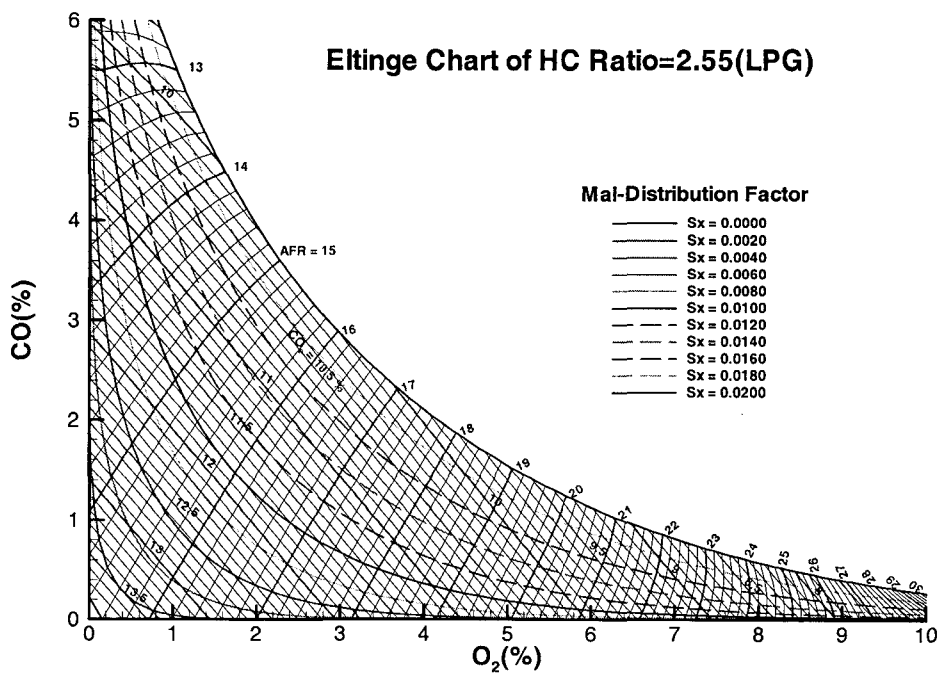


Fig. 6 Eltinge Chart for LPG(H/C Ratio=2.55)

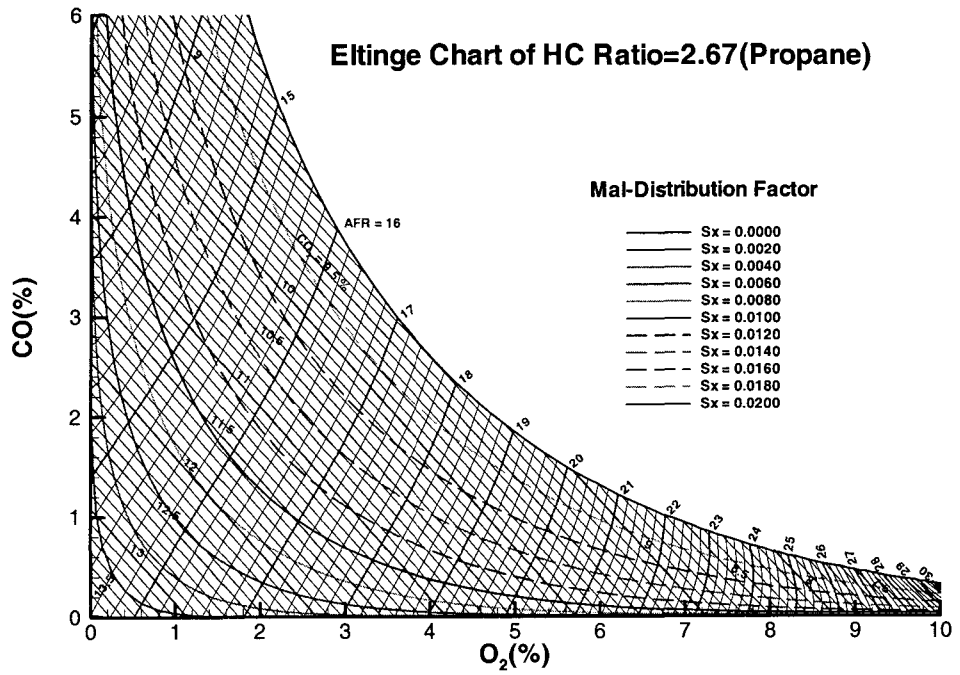


Fig. 7 Eltinge Chart for Propane(H/C Ratio=2.67)

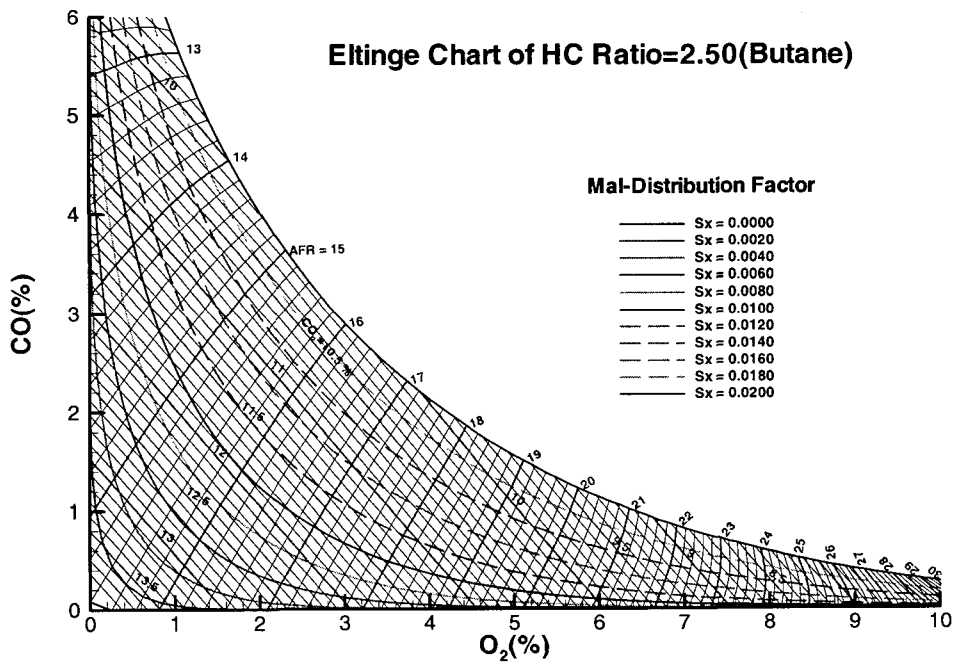


Fig. 8 Eltinge Chart for Butane(H/C Ratio=2.50)

는 허용하고 연료의 미연 성분은 없을 수 없으므로 작은 삼각형을 이루는 것이 정상이나 삼각형의 크기가 클 때는 분석기 샘플 라인의 누출, 비분산 적외선 분석기에서 흔히 발생하는 직선성 문제 등을 검토해 보아야 한다. 자세한 차트의 이용법과 미연성분의 보상은 Part II에서 논의하기로 한다.

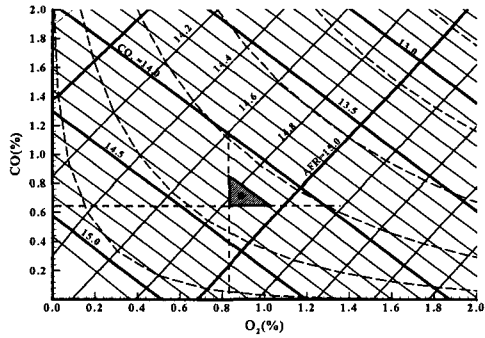


Fig. 9 AFR Reading in Eltinge Chart

4.2 공연비에 따른 배기 조성

Eltinge 차트는 대부분 공연비의 결정을 위해 사용되지만 그 일부를 이용하여 배기 조성에 대한 정보를 구성할 수 있다. 배기 조성을 실험적으로 또는 해석적으로 구한 대부분의 결과는⁽⁸⁾ 위에서 언급한 바와 마찬가지로 균일 혼합기 분포를 가정하였기 때문에 Eltinge 차트의 일부 데이터에만 해당된다. Fig. 10에 Eltinge의 방법으로 구한 배기 조성을 연료별로 또 공연비 분포에 따라 나타내었다.

그림에서 볼 수 있듯이 HCR에 따른 배기 조성의 특징은 HCR 증가에 따라 CO₂의 발생량이 줄어들고 있는데 이는 HCR이 증가하면 연료에 포함된 수소의 연소를 위하여 추가적인 산화제(공기)가 필요하고, 배기 중의 H₂O는 HCR 1 증가에 따라 0.5몰 증가하지만 건조 배기 조성에 포함되지 않고, 배기 중에 포함되지만 연소에 참여하지 않고 농도 결정에는 참여하는 N₂가 HCR 1 증가에 따라 0.5몰 증가하기 때문이다.

산소가 포함된 연료(methanol, M85 등)는 연료

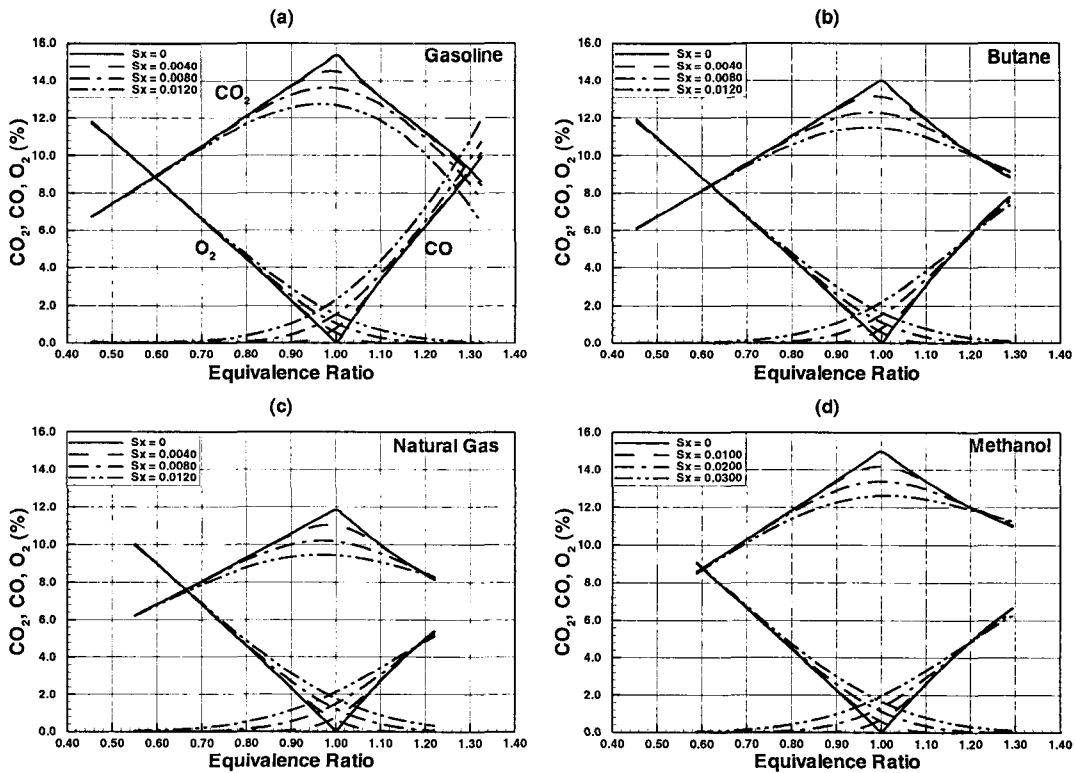


Fig. 10 Exhaust Composition as a Function of Equivalence Ratio and Sx, (a) Gasoline(HCR=1.85), (b) Butane(HCR=2.50), (c) Natural gas(HCR=3.87) and (d) Methanol(HCR=4.00, OCR=1)

에 포함된 산소로 인해 외부에서 공급되는 공기 필요량이 줄어들어 상대적으로 높은 CO₂ 배출 특성을 보여주고 있다. 즉 메탄(CH₄)의 경우라면 완전 연소를 위해 2×(1+3.764)몰의 공기가 필요하나 메탄올(CH₃O)의 경우 연료 중 포함된 산소로 1.5×(1+3.764)몰의 공기만 필요하므로 상대적으로 건조 배기의 주성분인 N₂가 줄어들고 발생하는 CO₂의 몰 수는 동일하므로 CO₂의 농도가 높게 나타난다.

연료 분포(S_x)에 따른 배기 조성의 특징은 이론 혼합비 근처에서 분포 상태의 영향을 가장 많이 받는 것으로 나타나고, 희박하거나 과농한 지역으로 갈수록 영향이 적어지는 것을 볼 수 있다. 이는 이론 혼합비에서 S_x가 증가하면 평균 공연비를 중심으로 희박 또는 과농한 쪽으로 분포된 혼합기의 양이 균등하게 증가하여 과농한 곳에서는 CO가 그리고 희박한 곳에서는 O₂가 추가적으로 발생하기 때문이다. 이론 혼합비를 벗어나면 분포가 과농과 희박 상태에 균등하게 분포되지 않고 한 방향으로 치우쳐지므로 이론 혼합비에서 벗어날수록 조성의 변화는 줄어들게 된다.

4.3 연료 조성에 따른 배기 조성의 변화

Fig. 11은 연료의 조성에 따라 즉 HCR이 변화함에 따라 건조 총 배기 물 수(CUT)와 각 연료의 배기 조성의 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 조성은 이론혼합비에서 HCR=2.67인 연료의 S_x=0.01에 해당하는 공연비 분포의 표준편차를 기준으로, 정확한 비교를 위해 각 연료에 대해 공기 과잉율 λ로 환산한 동일 표준 편차에 대하여 나타낸 것이다.

그림에서 볼 수 있듯이 각 배기 성분과 CUT는

대체로 HCR의 변화에 따라 일정한 방향으로 변하는 것을 관찰할 수 있다. 우선 HCR이 클수록 즉 연료에 포함된 수소가 상대적으로 많을수록 HCR의 변화에 따른 CO, CO₂ 발생량은 거의 직선적으로 감소한다. 그러나 CO는 가끔 불규칙한 변동을 보여주는데 대체로 이 때 CUT의 변동도 함께 발생한다. O₂는 HCR의 증가에 따라 대체로 증가하지만 역시 미세한 변동이 있고 이 변동 역시 CUT의 변동과 대체로 일치하고 있다. 그러나 O₂의 변동량은 다른 성분에 비해 비교적 적음을 알 수 있다. CO₂ 역시 CO와 O₂와 같이 미세한 변동이 있으나 배출량 자체가 많기 때문에 거시적으로 볼 때 직선적 경향을 보인다.

CUT와 각 배기 성분은 변동이 발생하는 HCR은 일치하나 그 방향은 일정하지 않음을 관찰할 수 있다. 이러한 변동은 열해리와 관련된 수성가스 반응 상수에 연관되어 연료 조성에 따라 배기 조성들이 차이를 가지기 때문으로 판단되지만, 전체 연료 분포에 대해 함수적으로 표현되는 혼합기 요소를 적분하여 얻어지는 Eltinge 차트의 특성 상 각 혼합기의 미소 구성 요소 구간마다 열해리의 영향을 개별적으로 평가하여 이를 정량적으로 해석하는 것은 사실상 불가능하다. 다만 HCR의 차이가 크게 나지 않는 LPG(2.55)와 프로판(2.67)의 경우를 비교하여 볼 때(Fig. 6, Fig. 7) 차트 내 동일 공연비 선이 서로 다른 경향으로 나타나고 동일 S_x에 대해서도 프로판의 배기 조성의 분포가 더 넓게 존재하는 것으로 보아, 각 배기 조성이 HCR과 쉽게 유추할 수 있는 단순한 관계를 갖는 것이 아님을 알 수 있고, 이에 따라 이러한 경향이 나타났다고 사료된다

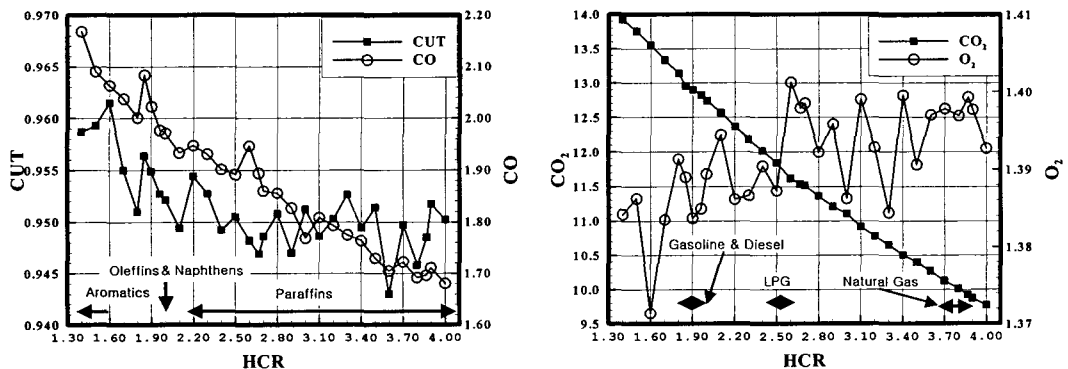


Fig. 11 Exhaust Composition and CUT as a function of HCR

5. 추후 진행 과제

연소반응은 촉매 등을 거치지 않는 한 완전연소 또는 이에 가까운 상태로 연소가 일어나지 않는다. 따라서 대부분의 공연비 산정법에서는 미연 성분에 대한 고려가 행해지고 있다. Eltinge 역시 이를 반영하였지만 차트 자체를 이를 고려하여 작성하는 것은 불가능하기 때문에, 일단 미연 성분이 없다고 고려하여 공연비를 결정한 후 이에 대한 보상을 실시하였다. 다른 방법과 Eltinge 방법의 결과 비교를 위해서는 이 보상이 반드시 필요하므로 후속 연구에서 그의 보상 방법에 대한 검토와 새로운 보상 방법의 모색 그리고 보정한 결과에 대해 논의할 예정이다.

아울러 현재 공연비의 산정은 Eltinge 방법 외에도 여러 가지 방법이 사용되고 있으나 방법간의 상호 비교는 거의 논의된 바가 없으므로 연료 조성 및 방법에 따른 각 산정 방법의 특징에 대해 논의할 예정이다.

마지막으로 본 논문에서는 Eltinge의 방법을 공연비 산정법의 기준으로 선정하였는데 그 근거에 대한 자세한 논의도 추후 진행될 것이다.

6. 결 론

연료에 대한 공연비-배기조성-연료 분포의 관계를 나타내는 Eltinge 차트를 임의의 구성을 가진 연료로 확장하여 현재 사용중인 대표적인 연료들에 대한 차트를 작성하였다. 공연비와 연료에 따른 배기 조성을 구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Eltinge 차트는 공연비 분포 상태를 고려함으로써 공연비와 배기 조성에 대해 가장 일반적인 정보를 제공한다.

(2) Eltinge의 방법에 의하면 연료 조성에 따라 연료의 분포도가 주어지면 이를 만족하는 배기 조성은 단 한가지 조합만 존재한다.

(3) Eltinge의 방법을 사용하여 일정 공연비에서 공연비 분포상태를 변경함으로써 동일 공연비에 대해서도 무수한 조합의 배기 조성 상태를 구할 수 있다.

(4) Eltinge 차트로 공연비를 결정함과 동시에 배기 조성의 물리적 합리성을 검증할 수 있다.

(5) 연료 중 수소의 비율이 클수록 이산화탄소

의 발생은 감소한다. 반면 연료에 함유된 산소는 이산화탄소의 발생을 증가시킨다.

(6) 연료 분포 상태는 이론 혼합비 근방에서 배기 조성에 가장 큰 영향을 준다.

(7) 연료 중 수소의 비율이 변환에 따라 배기 조성은 거시적으로 일정한 방향으로 변하나 미시적으로 작은 변동을 포함한다.

참고문헌

- (1) Wongeun Lee, Inyong Ohm, 2001, "Effects of the Method of Changing Compression ratio on Engine Performance in an SI Engine," *Transaction of Korea Society of Automotive Engineers*, Vol 9, No. 4, pp. 27-33.
- (2) John B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw-Hill, pp. 104.
- (3) R.S. Spindt, 1965, "Air-Fuel Ratio From Exhaust Gas Analysis," *SAE paper 650507*.
- (4) Donald L. Stivender, 1971, "Development of a Fuel-Based Mass Emission Measurement," *SAE paper 710604*.
- (5) L.S. Leonard, 1961, "Fuel Distribution by Exhaust Gas Analysis." *Paper 379A presented at the summer meeting*, St. Louis, Mo., June 5-9.
- (6) John B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw-Hill, p. 314.
- (7) Lamont Eltinge, 1968, "Fuel-Air Ratio and Distribution from Exhaust Gas Composition," *SAE Paper 680114*.
- (8) John B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw-Hill, pp. 145-152.

부 록 : Eltinge Chart 유도과정

A.1 CUT

$h(x)$ 는 혼합기가 균일하게 분포된 특정 요소에서 그 혼합기와 배기가스의 몰 비라는 의미를 갖는다. 여기서 실제 연소에서 국소공연비 x 가 전체 배기를 바탕으로 한 명목상의(또는 평균) 공연비 F/A 를 중심으로 확률밀도함수 형태의 분포도를 나타낸다고 가정하면(즉 평균 F/A 를 중심으로 표준편차를 갖는 가우스 분포) 전체 배기를 바탕

으로 한 명목상의 특정 공연비 F/A에서 건조공기 1몰 당 배기가스 총 몰 수 CUT는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$CUT = \int_0^{Sto} f(x) \cdot h(x) dx + \int_{Sto}^{\infty} f(x) \cdot h(x) dx \quad (17)$$

$f(x)$: Gauss 확률밀도함수

$$f(x) = \frac{1}{S_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-F/A}{S_x}\right)^2} \quad (18)$$

여기서 S_x 는 혼합기의 공연비 비균일성을 나타낸다. 이는 명목 공연비 F/A를 중심으로 공연비가 표준편차 S_x 를 갖고 가우스 분포되어 있다는 것이다. 변수 치환을 다음과 같이 한다.

$$t = \frac{x - F/A}{S_x} \quad (19)$$

(19)식을 이용하여 (10), (16)식을 t의 함수로 나타내면

$$h(x)_{lean} = D_1 + D_2(S_x \cdot t) \quad (20)$$

$$h(x)_{rich} = D_3 + D_4(S_x \cdot t) + D_5(S_x \cdot t)^2 \quad (21)$$

$$DC = \frac{\left(\frac{n}{2} - \frac{m}{4}\right) \cdot 138.01}{4.764 \cdot (12.011 + 1.00797m + 15.99n)}$$

$$D_1 = 1 + DC \cdot F/A \quad (22)$$

$$D_2 = DC$$

$$D_3 = A3 + A2 \cdot (F/A) + A1 \cdot (F/A)^2$$

$$D_4 = A2 + 2A1 \cdot (F/A)$$

$$D_5 = A1$$

(18), (19), (20), (21)식을 (17)식에 대입하면

$$CUT = \int_0^{Sto} h(x)_{lean} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{(-\frac{1}{2} \cdot t^2)} \cdot dt + \int_{Sto}^{\infty} h(x)_{rich} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{(-\frac{1}{2} \cdot t^2)} \cdot dt = \int_{-(F/A)/S_x}^T h(t)_{lean} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{(-\frac{1}{2} \cdot t^2)} \cdot dt + \int_T^{\infty} h(t)_{rich} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{(-\frac{1}{2} \cdot t^2)} \cdot dt \quad (23)$$

여기서 $T = t \Big|_{x=Sto} = \frac{Sto - F/A}{S_x}$ (24)

$$CUT = D_1 \int_{-(F/A)/S_x}^T \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{(-\frac{1}{2} \cdot t^2)} \cdot dt + D_2 S_x \int_{-(F/A)/S_x}^T \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot t \cdot e^{(-\frac{1}{2} \cdot t^2)} \cdot dt + D_3 \int_T^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{(-\frac{1}{2} \cdot t^2)} \cdot dt + D_4 S_x \int_T^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot t \cdot e^{(-\frac{1}{2} \cdot t^2)} \cdot dt + D_5 S_x^2 \int_T^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot t^2 \cdot e^{(-\frac{1}{2} \cdot t^2)} \cdot dt \quad (25)$$

A.2 특정 공연비에서 배기 성분 계산

$y_i(x)$ 를 특정 공연비 x에서 배기가스 중 각 분자의 몰농도로 두면 가정에 의해 다음과 같다.

$$y_1 = CO(x) \quad ; \quad x \geq Sto$$

$$= CO(x) = 0 \quad ; \quad x < Sto$$

$$y_2 = CO_2(x) \quad ; \quad x \geq Sto$$

$$y_3 = CO_2(x) \quad ; \quad x < Sto$$

$$y_4 = O_2(x) \quad ; \quad x \leq Sto$$

$$= O_2(x) = 0 \quad ; \quad x > Sto$$

$$y_1(x) = \frac{b-1}{b+(b-1)+d+e+3.764a} \quad (26)$$

$$y_2(x) = \frac{b}{b+(b-1)+d+e+3.764a} \quad (27)$$

$$y_3(x) = \frac{b}{b+(b-1)+d+e+3.764a} \quad (28)$$

$$y_4(x) = \frac{e}{b+(b-1)+d+e+3.764a} \quad (29)$$

회박 공연비에서의 공기 과잉률 범위를 $1 \leq \lambda \leq 2.07$, 즉 $0.48 \leq x \leq 1.00$ 으로, 과농 공연비에서의 공기 과잉률 범위를 $0.8 \leq \lambda \leq 1$, 즉 $1 \leq x \leq 1.25$ 로 설정하고 x 값과, x 값에 따른 $y_i(x)$ 를 몇 개 구한 후 이를 x에 대한 3차식으로 하여 가정하여 다음과 같은 식을 얻는다.

$$y_i(x) = C_{i1} + C_{i2} \cdot x + C_{i3} \cdot x^2 + C_{i4} \cdot x^3 \quad (30)$$

이것을 t에 관한 식으로 고치면

$$y_i(t) = CT_{i1} + CT_{i2}(S_x \cdot t) + CT_{i3}(S_x \cdot t)^2 + CT_{i4}(S_x \cdot t)^3 \quad (31)$$

여기서

$$\begin{aligned}
 CT_{\bar{1}} &= C_{\bar{1}} + C_{\bar{2}}(F/A) \\
 &\quad + C_{\bar{3}}(F/A)^2 + C_{\bar{4}}(F/A)^3 \\
 CT_{\bar{1}} &= C_{\bar{2}} + 2 \cdot C_{\bar{3}}(F/A) + 3 \cdot C_{\bar{4}}(F/A)^2 \quad (32) \\
 CT_{\bar{1}} &= C_{\bar{3}} + 3 \cdot C_{\bar{4}}(F/A) \\
 CT_{\bar{1}} &= C_{\bar{4}}
 \end{aligned}$$

A.3 배기 성분의 계산

건조 배기가스 중에서 각 배기 성분이 차지하는 농도 Y_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Y_{CO} &= \int_{Sto}^{\infty} y_1(x) \cdot g(x, F/A) dx \\
 Y_{CO_2} &= \int_{Sto}^{\infty} y_2(x) \cdot g(x, F/A) dx \\
 &\quad + \int_0^{Sto} y_3(x) \cdot g(x, F/A) dx \quad (33) \\
 Y_{O_2} &= \int_0^{Sto} y_4(x) \cdot g(x, F/A) dx
 \end{aligned}$$

여기서 $g(x, F/A)$ 는

$$g(x) = \frac{f(x) \cdot h(x)}{CUT} \quad (34)$$

CUT는 혼합기와 배기의 몰 비(또는 건조공기 1몰 당 총 배기 몰 수)이므로 $g(x)$ 는 명목상의 공연비 F/A 에서 국소 공연비 x 인 곳의 총 배기가스에 대한 몰 분율을 의미한다. 여기서 다시 (34) 식을 t 에 대한 함수로 변환하면 다음과 같다.

A.3.1 과농 공연비의 경우($i = 1, 2$)

$$y_i \cdot h(x)_{rich} = [CT_{\bar{1}} + CT_{\bar{2}}(S_x \cdot t) + CT_{\bar{3}}(S_x \cdot t)^2 + CT_{\bar{4}}(S_x \cdot t)^3] \cdot [D_3 + D_4(S_x \cdot t) + D_5(S_x \cdot t)^2] \quad (35)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{y_i \cdot h(x)_{rich}}{CUT} &= CU_{\bar{1}} + CU_{\bar{2}}(S_x \cdot t) \\
 &\quad + CU_{\bar{3}}(S_x \cdot t)^2 + CU_{\bar{4}}(S_x \cdot t)^3 \\
 &\quad + CU_{\bar{5}}(S_x \cdot t)^4 + CU_{\bar{6}}(S_x \cdot t)^5 \quad (36)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 CU_{\bar{1}} &= \frac{CT_{\bar{1}} \cdot D_3}{CUT} \\
 CU_{\bar{2}} &= \frac{CT_{\bar{1}} \cdot D_4 + CT_{\bar{2}} \cdot D_3}{CUT} \\
 CU_{\bar{3}} &= \frac{CT_{\bar{1}} \cdot D_5 + CT_{\bar{2}} \cdot D_4 + CT_{\bar{3}} \cdot D_3}{CUT} \\
 CU_{\bar{4}} &= \frac{CT_{\bar{2}} \cdot D_5 + CT_{\bar{3}} \cdot D_4 + CT_{\bar{4}} \cdot D_3}{CUT} \\
 CU_{\bar{5}} &= \frac{CT_{\bar{3}} \cdot D_5 + CT_{\bar{4}} \cdot D_4}{CUT} \\
 CU_{\bar{6}} &= \frac{CT_{\bar{4}} \cdot D_5}{CUT}
 \end{aligned} \quad (37)$$

A.3.2 희박 공연비의 경우($i = 3, 4$)

$$y_i \cdot h(x)_{lean} = [CT_{\bar{1}} + CT_{\bar{2}}(S_x \cdot t) + CT_{\bar{3}}(S_x \cdot t)^2 + CT_{\bar{4}}(S_x \cdot t)^3] \cdot [D_1 + D_2(S_x \cdot t)] \quad (38)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{y_i \cdot h(x)_{lean}}{CUT} &= CU_{\bar{1}} + CU_{\bar{2}}(S_x \cdot t) \\
 &\quad + CU_{\bar{3}}(S_x \cdot t)^2 + \\
 &\quad CU_{\bar{4}}(S_x \cdot t)^3 + CU_{\bar{5}}(S_x \cdot t)^4 \quad (39)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 CU_{\bar{1}} &= \frac{CT_{\bar{1}} \cdot D_1}{CUT} \\
 CU_{\bar{2}} &= \frac{CT_{\bar{2}} \cdot D_1 + CT_{\bar{1}} \cdot D_2}{CUT} \\
 CU_{\bar{3}} &= \frac{CT_{\bar{3}} \cdot D_1 + CT_{\bar{2}} \cdot D_2}{CUT} \\
 CU_{\bar{4}} &= \frac{CT_{\bar{4}} \cdot D_1 + CT_{\bar{3}} \cdot D_2}{CUT} \\
 CU_{\bar{5}} &= \frac{CT_{\bar{4}} \cdot D_2}{CUT}
 \end{aligned} \quad (40)$$

A.3.3 각 배기 성분의 계산

$t = (x - F/A) / S_x$ 로 두었으므로

$$\begin{aligned}
 Y_{CO} &= \int_T^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{(-\frac{1}{2} \cdot t^2)} \\
 &\quad \cdot \left\{ \sum_{n=1}^6 CU_{1n}(S_x \cdot t)^{n-1} \right\} \cdot dt \quad (41)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_{CO_2} = & \int_T^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{(-\frac{1}{2} \cdot t^2)} \\
 & \cdot \left\{ \sum_{n=1}^6 CU_{2n}(S_x \cdot t)^{n-1} \right\} \cdot dt \\
 + & \int_{-(F/A)/S_x}^T \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{(-\frac{1}{2} \cdot t^2)} \\
 & \cdot \left\{ \sum_{n=1}^5 CU_{3n}(S_x \cdot t)^{n-1} \right\} \cdot dt
 \end{aligned} \tag{42}$$

$$\begin{aligned}
 Y_{O_2} = & \int_{-(F/A)/S_x}^T \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{(-\frac{1}{2} \cdot t^2)} \\
 & \cdot \left\{ \sum_{n=1}^5 CU_{4n}(S_x \cdot t)^{n-1} \right\} \cdot dt
 \end{aligned} \tag{43}$$

(41)~(43)식을 F/A 및 S_x 에 대해 적분한 결과가 특정 HC Ratio와 OC Ratio를 갖는 연료의 공연비와 혼합기 분포에 상태에 따른 배기 조성의 차트 즉 Eltinge 차트이다.