

# 기체분리막에 의해 상승된 산소농도가 스파크점화기관의 연소에 미치는 영향

## The Effects of Oxygen-Concentration Increased by Oxygen-Enriching Membrane on Combustion of S.I. Engines

권 병 철\*, 김 형 섭\*\*  
B. C. Kwon, H. S. Kim

### ABSTRACT

The purpose of this study is to improve the performance of gasoline engine. Combustion-characteristics originated from supplying cylinder with fuel-air mixture which was formed by the rise of oxygen-concentration in air with oxygen-enriching membrane have been investigated.

The results showed that the poor-limit of oxygen-concentration was increased by shortening combustion-duration because the rise of oxygen-concentration in fuel-air mixture resulted in the promotion of combustion-velocity. Also, the generation of large output of power was expected from combustion in proportion as the amount of oxygen was increased.

Key words : Oxygen-Enriching Membrane, Oxygen-Enriching Air, Oxygen-Concentration, Ignition Delay, Main Combustion Duration, Mass Burning Rate, Fuel Mass Concentration, Oxygen-Fuel Mass Ratio, Excess Oxygen Ratio, Pressure Distribution, Hollow Fiber Type Module, Poor Limit, Minimum Spark Advance for Best Torque.

### 1. 서 론

최근의 자동차용 가솔린기관은 쾌적하고 경제적인 운전을 위하여 출력향상이 요구됨과 동시에 연료소비율의 개선이 중요한 과제로 등장하고 있다. 또한 배기가스에 의한 환경오염이 중요한 문제로 제기되므로써 배기상태의 개선도 요망되고 있다.

가솔린기관의 출력향상을 위한 한 가지 방법으로는 과급기를 부착하는 것이 일반적인 경향이나 배기계통 및 과급기의 열적문제, 연료

소비율 저하등의 문제가 내포되고 있다. 또한 연료소비율 개선을 위한 일반적인 방법으로 희박연소의 실현을 위해 실린더내에 충전되는 혼합기에 난류롤 생성시키는 방법등이 연구되고 있으나 실용상으로 여러문제가 제기되고 있다.

이러한 관점에서 가솔린기관의 성능향상을 위한 현재까지 대부분의 연구방법은 물리적인 측면에서 시도되고 있으나 실린더내의 연소에 관해서 아직도 많은 문제가 남아 있다고 생각된다. 그러므로 근래에는 연소상태 개선을 위

\* 대전공업대학 기계설계학과

\*\* 아주대학교 기계공학과

한 화학적인 접근 방법의 하나로서 실린더에 공급되는 공기중의 산소농도를 상승시켜 연소시키는 방법이 연구되고 있다.<sup>1)</sup> 현재까지 내연기관에서 산소농축공기를 이용한 연소의 연구는 대부분 디젤기관에서 이루어져 왔으나<sup>2,3)</sup> 최근에는 가솔린기관에서도 연구가 행하여지고 있으며 이때의 대부분의 산소공급 장치는 액화산소용기를 이용하고 있다.<sup>5)</sup> 그러나 액화산소용기를 이용하는 데에는 경제적인 문제, 안정성의 문제 및 공급적인 측면에서 볼 때 실용상으로 많은 문제가 제기되고 있다.

실린더내에 산소농도가 상승된 공기를 이용하여 혼합기를 형성시켜 충전시키면 전부하시에는 산소량의 상승에 비례하는 연료의 공급에 의해 발열량이 증가하여 출력상승이 기대될 수 있으며 부분부하 및 아이들링 운전시에는 연소속도의 증가에 의해 안정한 연소<sup>6)</sup>가 예상되어질 수 있다. 또한 배기가스에 관해서는 연소상태의 개선에 의해 CO 및 HC의 배출은 억제가능하나 연소온도가 상승하므로서 NO<sub>x</sub>의 발생은 증가할 것으로 추측된다.

본 연구에서는 최근 기체분리막기술의 발달로 공기중의 산소농도를 값싸게 상승시키는 산소농축시스템이 개발<sup>7)</sup>되므로서 새로운 연소방법으로 기대되는 산소농축공기를 이용한 연소연구의 필요성에 주목하여, 가솔린기관에서 산소농축공기를 이용한 혼합기를 실린더에 공급할 때 발생하는 연소특성에 관하여 검토하고자 한다.

## 2. 기체분리막에 의한 산소농축시스템

기체분리막으로서 산소농축막은 막의 표면에 접하는 공기를 비다공질막을 통과시키므로써 막내에서 산소와 질소의 투과성의 차를 이용하여 공기중에 함유되어 있는 산소의 비율을 높여주어 농축산소를 만든다. 막의 표면을 따라 흐르는 공기는 이면의 저압에 의한 압력차에 의해 산소 및 질소분자가 막의 표면에서 용해된 후 막내를 확산하여 표면에서 이탈하므로 막을 투과한다. 이때 산소의 용해

확산속도가 질소에 비하여 크기 때문에 저압측에서는 산소농도가 상승된 공기가 얻어진다.

본 실험에 사용된 산소분리막모듈은 중공사형으로 막성능시뮬레이션 모델을 Fig. 1에 나타낸다. 여기에서 분리막을 투과하는 기체의 농도는 분압에 비례함을 나타내는 Henry의 법칙으로부터, 확산량은 농도구배에 비례함을 나타내는 Fick의 법칙으로부터 구할 수 있다. 입구에서 출구까지의 분할수를  $n$ 이라 할 때 산소농축공기의 농도( $X_c$ )와 산소농축공기유량( $Q_o$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_c = \frac{\sum_{z=1}^n q_{O_2}(Z)}{\sum_{z=1}^n q_{O_2}(Z) + \sum_{z=1}^n q_{N_2}(Z)} \quad (1)$$

$$Q_o = \sum_{z=1}^n q_{O_2}(Z) + \sum_{z=1}^n q_{N_2}(Z) \quad (2)$$

여기에서  $q_{O_2}(Z)$  : 입구에서  $Z$ 번째의 산소 투과량

$q_{N_2}(Z)$  : 입구에서  $Z$ 번째의 질소 투과량

또한 산소농축공기의 1차측 원료공기( $Q_A$ )로부터의 회수율( $W_d$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_d = Q_o / Q_A \times 100 (\%) \quad (3)$$

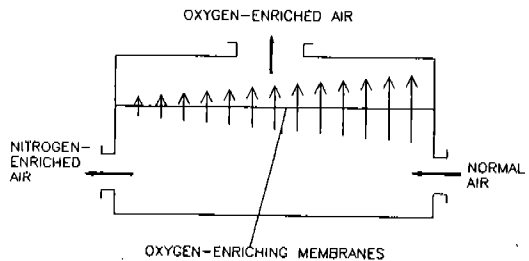


Fig. 1 Simulation model of oxygen-enriching membranes

### 3. 실험장치 및 방법

Fig. 2는 본 연구에 사용된 실험장치의 계통도이다. 실험에 사용된 산소분리막모듈의 구조를 Fig. 3에 나타내었다. 원통형의 모듈(지름 130 mm, 길이 1,200 mm)내에는 1 차측 공기의 흐름방향과 평행으로 증공사출이 복수로 배열되어 있고 1 차측공기의 주위에 산소선택 투과기능을 갖는 복합증공사출을 평행으로 배치하여 한쪽끝에 개구부를 설치하였는데, 본 실험에서는 이 모듈을 평행으로 2개 사용하였다. 송풍기에 의해 압입된 1 차측 공기는 산소분리막모듈에서 산소농도가 상승된 후 혼합용기에서 외부의 공기와 혼합되고 주위에 남은 산소농도가 낮아진 공기(질소농축공기)는 배출구에서 외부로 토출된다. 또한 산소농축공기는 서어지탱크에서 더욱 균일한 조성이 이루어진 후 기화기에 공급된다. 이때 모듈 1 차측 및 2 차측의 유량, 온도 및 압력을 각각 측정하였으며 기관 흡입공기의 산소농도는 혼합용기와 증류형유량계 사이에서 산소농도계로 측정하였다. 또한 기관흡입공기의 온도를 서어지탱크에서 측정하고 기관흡입공기유량은 혼합용기와 서어지탱크사이에 설치한 증류형 유량계의 유량차압에 의해 계산하였다.

실험에 사용된 기관은 공냉 4사이클 단기통기관으로 그 제원을 Table 1에 나타낸다. 기관의 출력측정 및 회전수제어용으로는 3상분권정류자형 전기동력계를 기관출력측과 직결하여 사용하였다.

Table 1 Specification of engine

Engine type	Air cooled 4cycle gasoline engine
Cylinder number	1
Bore * Stroke (mm)	76.2 * 58.9
Stroke volume (CC)	311
Compression ratio	7.2 : 1
Maximum output (KW/rpm)	5.1/4000
Maximum torque (N. m/rpm)	13.7/2800

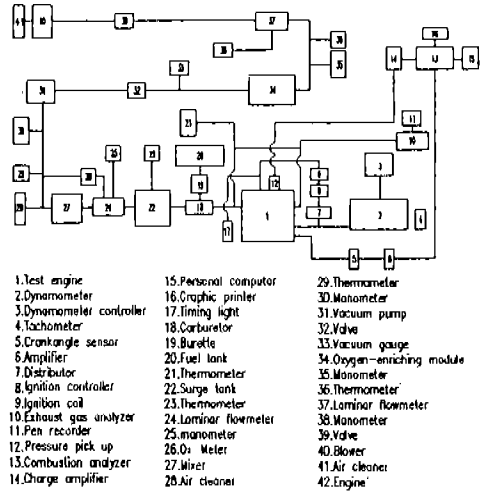


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

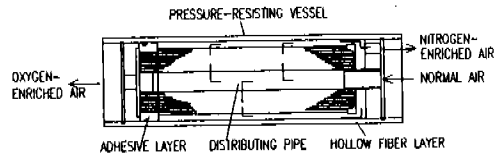


Fig. 3 Hollow fiber type module

연료유량은 기화기의 메인젯트로 조절하였고 점화시기의 측정은 타이밍라이트를 사용하였다. 실린더내의 압력검출은 압력지압변환기를 실린더헤드에 부착한 후 전압을 변화시켜 연소해석장치에 입력시켰으며 크랭크각 검출은 광회아바식 크랭크각 검출기와 증폭기를 사용하여 연소해석장치에 출력시켰다. 연소상태의 해석에는 11 종류의 특성분석이 가능한 연소해석장치를 사용하였다. 연료질량농도( $F_c$ )는 산소농축공기유량을 고려하여 다음과 같이 계산하였다.

$$F_c = (m_f / m_a + m_o + m_f) \times 100 (\%) \quad (4)$$

여기에서  $m_f$  : 연료질량유량  
 $m_a$  : 기관부흡입공기질량유량  
 $m_o$  : 산소농축공기질량유량  
 실험조건으로는 기관회전수 1200rpm, 교축

밸브개도 전개, 당량비를 1로한 상태에서 공기중의 산소농도를 21%에서 25%까지 변화시켰다. 연소해석장치에서의 데이터 추출값은 360 사이클의 평균값이다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 4에 점화시기를 MBT (Minimum Spark Advance for Best Torque)로 하였을 때 각산소농도에 대한 실린더내의 압력을 크랭크 각도에 따라 나타내었다. 선도에 나타난 바와 같이 산소농도가 증가할수록 실린더내의 최고압력( $P_{max}$ )은 높아지게 됨과 동시에 최고압력 발생시기가 상사점에 접근하므로써 혼합기중의 산소비율이 증가할수록 연소촉진현상이 뚜렷이 나타난다. Fig. 5와 Fig. 6은 점화시기에 따른 실린더내 최대압력 발생치의 크랭크 각도에 따른 분포상태를 나타낸 것이다.

동일한 점화시기라도 혼합기중의 산소농도가 증가하면 최고압력발생 크랭크각도 범위는 앞당겨지고 집중적인 최고압력이 발생하는데 이러한 현상은 점화진각이 이루어지면 더욱 뚜렷이 나타난다. 즉 혼합기중의 산소비율이 높아지므로써 매 사이클마다 최고압력에 도달하는 크랭크각도범위가 단축되고 있어 공기만을 이용한 혼합기보다 연소변동이 감소하고 있음을 알 수 있다. 실린더내의 연소변동의 원인으로서는 당량비, 잔류가스의 농도, 혼합기의 불균일성, 실린더내 가스유동상태 등에 의해 기인되나<sup>8)</sup> 산소농도의 증가에 의해 연소효율이 향상되므로써 이러한 연소변동이 억제되고 있다고 생각된다.

Fig. 7과 Fig. 8에 점화시기를 MBT로 하였을 때 크랭크각도에 따른 질량연소율과 열발생율을 나타내었다. 점화시기부터 질량비 90%까지의 연소기간은 산소농도가 증가할수록 선도상의 폭이 좁아지고 있음을 알 수 있다. 즉, 연소속도의 증가에 의해 연소기간이 단축되고 있음을 나타내고 있으며, 열발생율도 산소농도의 증가와 더불어 커지고, 보다 빨리 최대의 발열상태에 도달하므로써 산소농도의 증

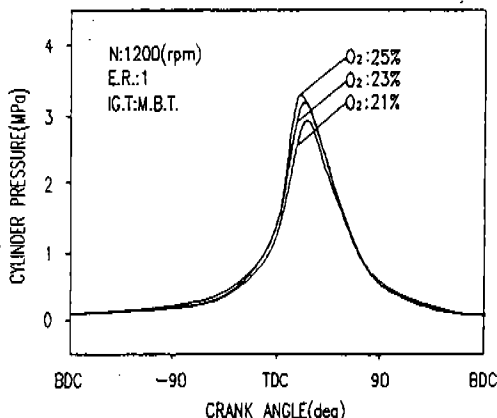


Fig. 4 Relationship between oxygen-concentration and cylinder pressure

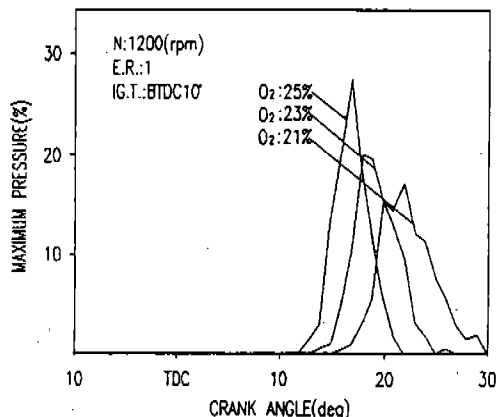


Fig. 5 Distribution of maximum pressure caused by oxygen-concentration

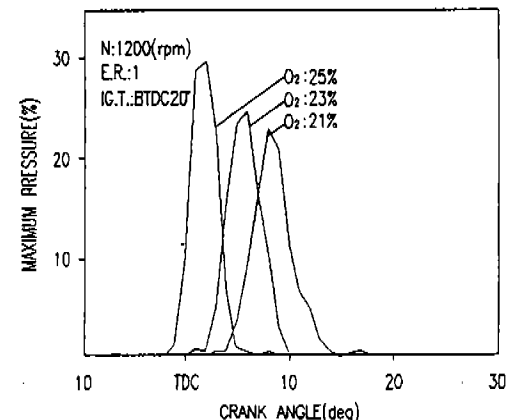


Fig. 6 Distribution of maximum pressure caused by oxygen-concentration

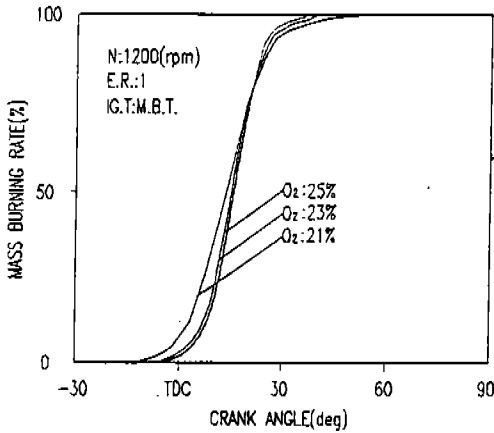


Fig. 7 The effect of oxygen-concentration on mass burning rates

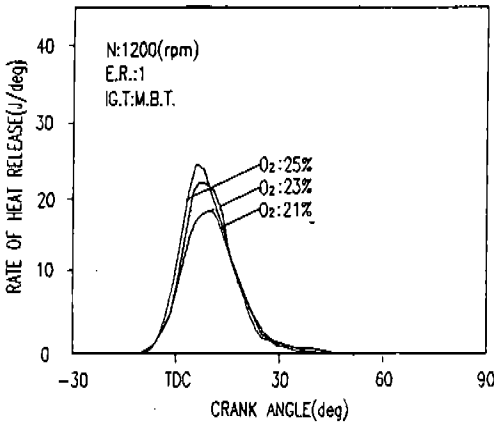


Fig. 8 The effects of oxygen-concentration on rates of heat release

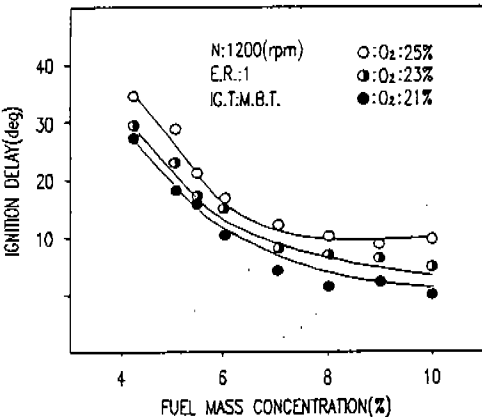


Fig. 9 The effects of fuel mass concentration on ignition delays

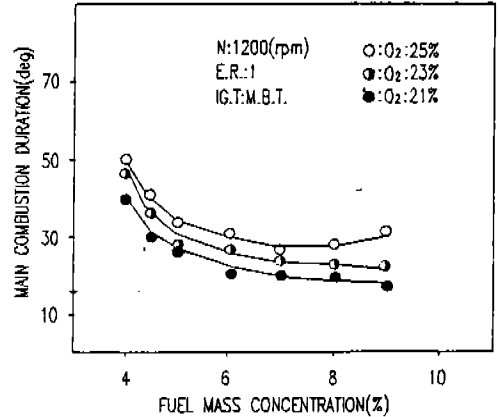


Fig. 10 The effects of fuel mass concentration on main combustion durations

가에 따른 연소기간의 단축으로 희박한계가 확대되고 유효발열량이 증가함에 따라 연소효율이 향상되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 MBT에서 연료질량농도에 대한 점화지연기간과 주연소기간을 산소농도에 대하여 나타낸 것이다. 일반적으로 가솔린기관에서는 혼합기농도, 전극부근의 유동상황, 온도, 압력 등에 따라 차이가 있으나 점화지연은 대략  $1.7 \times 10^{-6}$  (ms) 정도로 알려져 있다. 본 실험에서는 점화지연기간을  $I_D$ , 점화시기를  $I_T$ , 연소시작점(열발생시작점)을  $I_\theta$ 로 나타내어

$$I_D = I_T - I_\theta \quad (5)$$

로 하였을 때 산소농도 21%에서 약  $1.4 \times 10^{-6}$  (ms) 정도, 산소농도 25%에서 약  $2.5 \times 10^{-7}$  (ms)로서 대략 1/6 정도 점화지연기간이 감소함을 나타내었다. 또한 질량연소를 10%까지의 초기연소기간을  $\theta_{10}$ , 90%까지의 연소기간을  $\theta_{90}$ 으로 하여 주연소기간  $C_T$ 를

$$C_T = \theta_{90} - \theta_{10} \quad (6)$$

로 정의하였을 때 산소농도가 증가할수록 연소진행기간은 단축되고 있음을 나타내고 있다. 이상과 같이 실린더내에서의 연소상태가 혼합

기중의 산소농도가 증가할수록 개선되는 주요한 원인은 다음의 2가지 경우라고 생각된다. 첫째는 연소효율이 향상되므로서 유효발열량이 증가하는데 기인되기 때문이다. 흡입공기 총체적유량을  $Q$ , 연료질량유량을  $G_f$ , 산소농도를  $O_2c$ 라 하고, 실험에 사용된 가솔린의 밀도를  $740(\text{kg/m}^3)$ 라 하였을때 산소연료질량비 ( $O_2/F$ )를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$O_2/F = 1.429 \times Q \times O_2c / G_f \quad (7)$$

또한 이론산소량을  $M_{th}$ 로 하여 산소과잉률 ( $\lambda$ )을 정의하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda = O_2/F / M_{th} \quad (8)$$

여기에서 이론산소량은 본 실험에서 사용한 가솔린의 조성을 고려하여 계산하면  $M_{th}=3.43$ 이다. 이때 각산소농도에 대한 산소연료질량비( $O_2/F$ ) 및 산소과잉률( $\lambda$ )은 Table 2와 같다.

Table 2 Oxygen-fuel mass ratio and excess oxygen ratio

OXYGEN-CONCENTRATION	OXYGEN-FUEL MASS RATIO	EXCESS OXYGEN RATIO
$O_2(21\%)$	$O_2/F = 2.85$	$\lambda = 0.83$
$O_2(23\%)$	$O_2/F = 3.08$	$\lambda = 0.90$
$O_2(25\%)$	$O_2/F = 3.37$	$\lambda = 0.98$

위의 Table 2에서 알 수 있는 바와같이 대기상태인 산소농도 21%에서는 연료과잉상태이나 산소농도 25%에서는 거의 이론산소연료질량비에 가까운 연소가 되므로서 유효발열량이 증가하는 것이라고 볼 수 있다. 둘째는 연소속도의 증대에 의해 연소기간이 단축되는 데 있다. 연소기간이 단축된다고 하는것은 보다 오토사이클에 접근하는 것을 의미한다. 즉 산소농도가 증가함에 따라 연료와 공기중의 산소분자의 접촉빈도가 높아지므로서 연소속도가 증가하는 것이라고 생각된다.

## 5. 결 론

기체분리막을 이용하여 산소농축공기를 가솔린기관에 공급했을 때, 산소농도가 연소에 미치는 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 산소농도가 증가하면 점화지연기간이 단축되고 최고압력과 열발생율이 증가한다.
- 2) 산소농도가 증가하면 연소속도의 증가에 의해 연소기간이 단축되므로서 희박한계가 커진다.
- 3) 혼합기중의 산소비율이 증가하여도 연소상태가 안정되므로서 이에 비례하는 연료의 추가공급에 의해 고출력의 발생이 기대될 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. H.P. Willumeit, M.Bauer : Emissions and Performance of an S.I. Engine Inducting Oxygen-Enriched Combustion Air, MTZ., 49-4, pp.149-152, 1988.
2. 正寺尾邦尺 : 酸素富化空氣によるディーゼル機關駆動の研究, 日本機械學會 第948回講演會, No.870-11, pp.8-9, 1987.
3. 佐藤 豪外 4人 : 酸素富化給氣による直接噴射式ディーゼル機關の微粒子の低減, 自動車技術會論文集, No.35, pp.36, 1987.
4. J. Ghojel, J.C. Hilliard and J.A. Levensis : Effect of Oxygen Enrichment on the Performance and Emissions of LD.I Diesel Engines, SAE Paper, No.830245, 1983.
5. A.A. Quader : Exhaust Emissions and Performance of a Spark Ignition Engine Using Oxygen Enriched Intake Air, Combustion Science and Technology, Vol.19, pp.81-86, 1978.
6. A. Egerton, S.K. Thabet : Flame Propagation : The Measurement of Burning Velocities of Slow Flames and the Determination of Limits of Combustion, Proc. Roy. Soc. Vol.211, A, pp.445-471, 1952.

7. 酸素富化膜燃焼技術研究組合, 酸素富化膜の開発とめの燃焼システムへの應用, 工業加熱, 9月, 11月, 1986.
8. 田中宗信外 2人: メタノール改質ガスエンジンに関する研究, 日本機械學會論文集, 第484號B編, pp.4084-4093, 1986.