

〈논문〉 SAE NO. 933762

헬륨 기체분류의 정상적 비정상적 거동에 관한 연구

A Study on Steady and Unsteady Behavior of Helium Jet in the Stationary Atmosphere

김 봉 근,* 서 용 권,** 하 종 릉,** 권 순 석**
B. G. Kim, Y. K. Suh, J. Y. Ha, S.S.Kwon

ABSTRACT

This study aims to analyze the mixing characteristics of hydrogen considered as a new fuel for internal combustion engines. As the physical property of helium gas is similar to that of hydrogen, helium gas was used in this study.

To analyze the steady and unsteady behavior of jet, helium gas was injected into the stationary atmosphere at the normal temperature and pressure.

Concentration of helium gas in the center of jet flow is in inverse proportion with axial distance from the nozzle tip. This agrees with the free jet theory of Schlichting.

The relative equation for dimensionless concentration to radial/axial distance the axial distance of potential core region, the cone angle α of the jet flow and the relative equation for arriving distance of the front of jet flow to the lapse of time are obtained. But free jet theory of Schlichting in the dimensionless concentration is not in agreement with the present experimental results of the distance of the radial direction. It needs more study. When the arrival frequency of jet flow is used as a parameter, the transition area changing from unsteady flow area into steady flow area becomes gradually wider downstream, but its ratio for the whole unsteady flow area gradually decreases.

주요기술용어 : Retarder(분사지연기), GPIB(General Purpose Interface Bus), Orthogonal Variable(직교축 변수), Shifting(분출정점의 이동), Entrance Effect(입구효과), Potential Core Region(핵 이디는 지역), Transition Point(전이점), DIO(Data In Out)

1. 서 론

자동차 수의 증가에 의한 대기오염의 심각, 석유 생산량의 한정과 가격상승등으로 석유는

내연기관의 연료로서 부적합한 면이 있다. 석유의 대체 에너지로서 연소 배출물이 깨끗하고, 높은 열량을 가지고 있으며, 자연으로부터 무제한적으로 얻을 수 있는 수소연료가 주목되고 있다.

* 정회원, 동의공업전문대학 기계설계과

** 정회원, 동아대학교 기계공학과

수소기관에 대한 연구는 Ricardo¹⁾, Burstall²⁾, Erren & Campbell³⁾ 등의 수소기관의 기본적 특성에 관한 연구를 위시하여 karim & Taylor⁴⁾, Finegold & Van Vorst⁵⁾ 등의 많은 연구보고들이 있다. 수소가스를 연소실 내로 직접 분사하는 수소기관의 실용화를 위해서는 수소분류의 정상적, 비정상적 혼합과정에 대한 기초연구가 필요하다. 이것에 관한 연구로 高橋⁶⁾는 헬륨가스를 정지(靜止) 대기중에 분사하고 Mach-Zender 및 Schlieren 장치를 이용하여 헬륨분류를 가시화하여 그 화상을 해석함으로써 시간에 대한 공간농도 분포를 구하였다. 田邊⁷⁾ 등은 헬륨가스를 이용하여 비정상 분류에 대한 농도변동의 확률밀도 분포, 분류내의 유속, 동압 및 정압분포 등에 대하여 조사하였다.

본 연구에서는 수소가 폭발할 위험이 있으므로 수소와 물성이 비교적 유사한 헬륨가스를 상온상압의 정지 대기중에 분사하여 헬륨분류의 농도분포, 주위 공기의 엔트레인먼트, 분류의 시간경과에 대한 공간농도분포, 비정상류에서 정상류로의 천이구역등 자유분류의 특성을 밝히고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

간헐적으로 단발(單發)분사한 헬륨 기체분류가 주위공기와 혼합하면서 성장하는 과정은 시간적 공간적으로 변화하는 난류현상이므로 분류를 포착하는 데에는 측정계에 높은 응답성이 요구된다. 본 연구에서는 Fig.1에서와 같이 열선농도프로브(probe), 열선유속계(hot wire anemometer), 오토-디지털라이저(auto-digitizer), IEEE-488(GPIB)·RS-232C·DIO 인터페이스, 스텝모터(steping motor)등을 이용하여 국소농도가 시(時)계열 데이터로 자동 연속 측정되도록 실험장치를 만들었다.

2.1.1 열선 농도프로브의 구조

난류혼합에 의한 불규칙적인 농도의 변동을 알기 위하여 Brown & Rebollo⁹⁾, 大西¹⁰⁾, 田邊⁷⁾

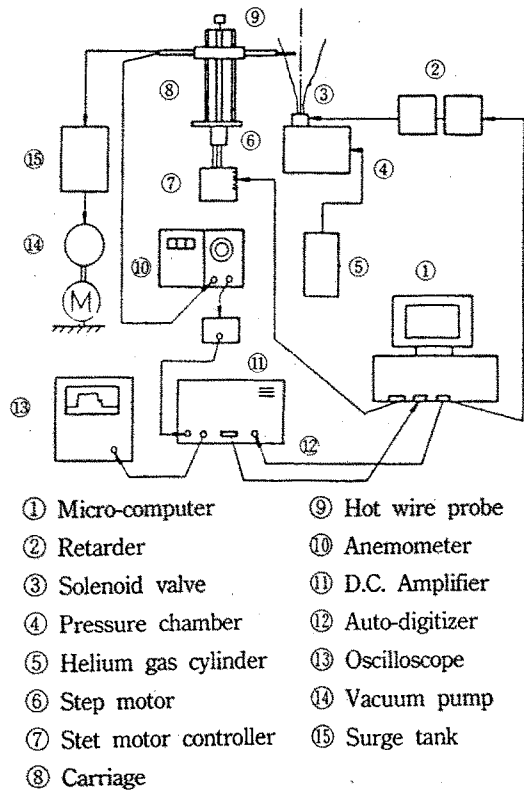


Fig.1 Schematic diagram of experimental set up.

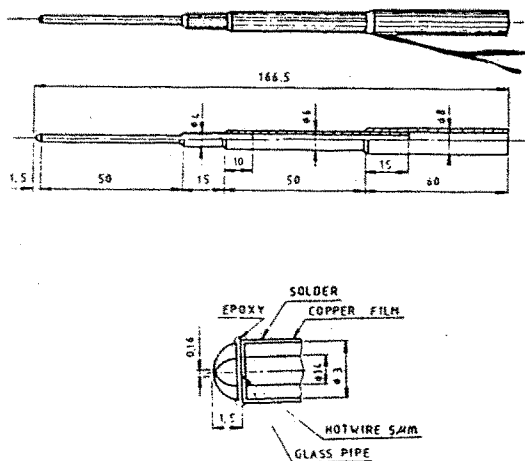


Fig.2 Structure of hot wire probe.

13)에 의하여 개발된 열선 농도프로브를 만들어 사용하였다. 열선농도계의 구조는 Fig.2와 같으며 유리관($\phi 3$) 선단부에 열선(텅스텐, $\phi=5\mu\text{m}$, $L=1\text{mm}$)을 직각으로 설치하고 그위에 흡인노즐($\phi 0.16$)을 얹어 접착제로 접착하였다. 흡인노즐의 반대쪽은 서지탱크(surge tank)를 경유하여 진공펌프에 접속된다. 열선은 정온도형 열선유속계에 연결되며, 혼합기의 농도를 감지한다.

2.1.2 측정원리

분사되는 헬륨분류의 중심축에 열선 농도프로브를 직교시키고 진공펌프에 의하여 헬륨가스와 공기로된 혼합기를 흡인하면 열선의 방열량은 열선 주위기체의 유속·열전도율·밀도·점성·열선과 주위기체의 온도차등에 의하여 결정된다.

상온 상압의 정지 대기중에 분사한 헬륨가스의 채취공간(흡인노즐의 내부)의 온도변화는 단열 팽창에 의하여 열선주위에서는 거의 일정하게 되고 텅스텐 열선의 열관성을 최소로 함으로써 열선의 온도를 일정으로 만든다. 그러므로 열선의 방열량은 채취기체의 물성치에 의해서 결정된다. 즉, 헬륨가스와 공기의 혼합기 조성에 따라 방열량이 달라지고 정온도형 열선유속계에서는 열선의 전위차로부터 피드 백(feed back), 전류로 변환하여 열선에 흐르는 전류를 제어한다.

Fig.3은 혼합기 흡인노즐의 내부를 가로지르는 열선을 나타낸 것이며, 열선에 유입되는 단위시간당의 열량(Q_{in})과 열선에서 유출되는 단위시간당의 열량(Q_{out})은 다음식으로 주어진다.

$$Q_{in} = I^2 \cdot R_w \quad (1)$$

$$Q_{out} = f(U, \rho, C_p, \lambda, l_w, d_w, T_w - T_a) \quad (2)$$

여기에서 기호는 유속(U), 분류기체의 밀도(ρ), 정압비열(C_p), 열전도계수(λ), 열선의 길이(l_w), 직경(d_w), 열선의 온도(T_w) 주위공기의 온도(T_a)를 표시한다. 열선의 길이와 직경은 열선에 의하여 정해지는 값이며 열선의 온도는 열선유속계의 제어회로에 의하여 일정값으로 유지된다. 열선의 주위기체가 등온·등압으로 유지되면 분류기체의 밀도·정압비열·열전도계수는 각각

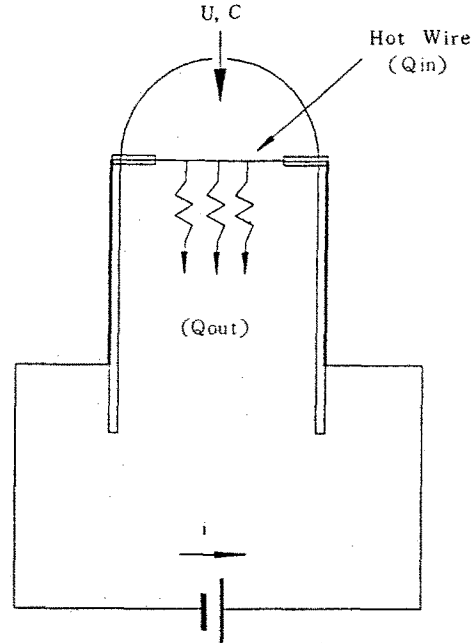


Fig.3 Heat transfer from hot wire by mixture gas.

주위기체의 종류에 따라 변화함으로써 2 성분계 혼합기에서 농도를 C 라 하면 $\rho = \rho(C)$, $C_p = C_p(C)$, $\lambda = \lambda(C)$ 로 된다. 이들의 관계로부터 식 (1)과 (2)는 식 (3)과 (4)로 된다.

$$Q_{in} = Q_{out} \quad (3)$$

$$I^2 \cdot R_w = f(U, C) \quad (4)$$

열선주위의 유속(U)을 음속으로 하여 U 를 일정으로 하면 전류 I 로부터 농도 C 가 구해진다. 실제로 전류 I 의 변화는 제어회로에 의하여 전압으로 표시된다.

2.1.3 장치의 동작

헬륨분류의 자동계측을 위한 시스템의 동작은 Fig.1을 참고하면 다음과 같다.

헬륨가스는 헬륨실린더 ⑤에서 0.19MPa의 압력으로 조절되어 축압실 ④에 충전된다. 축압실은 1회의 노즐 분사량에 대하여 압력변동이 없도록 충분히 큰 용량($0.48 \times 10^{-2} \text{m}^3$)이며 전자(電磁)밸

브 ③의 열림에 의하여 헬륨가스가 단발 분사된다. 진공펌프 ⑭는 서지탱크 ⑮를 중계하여 진공도를 일정하게 유지하고 열선 농도프로브 ⑨를 통하여 주위로부터 공기를 연속적으로 흡인한다. 마이크로 컴퓨터 ①이 전자밸브 제어회로에 디지털 신호를 송신하면 지연기(retarder) ②는 샘플링 시간을 조정하고 전자밸브 ③을 개폐하여 헬륨가스를 단발 분사시킨다. 이때 열선농도프로브 ⑨는 헬륨과 공기의 혼합기를 흡인하며, 혼합기의 농도는 정온도형 열선유속계 ⑩에서 전압으로 표시된다.

측정된 혼합기 농도가 전압으로 표시된 아날로그(analog) 값은 증폭기를 거쳐 오토-디지털타이저 ⑪에서 시간의 경과에 대한 혼합기 농도의 변화를 표시하기 위하여 시간간격이 $40\mu s \cdot 1000$ 개의 디지털값($40\mu s \times 1000 = 40ms$)으로 변환되어 일시적으로 저장된다. 데이터의 일시저장은 컴퓨터의 데이터 처리시간이 길고 측정데이터가 미약하기 때문에 컴퓨터가 데이터를 받아들일 수 있을때 까지 대기하였다가 데이터를 증폭하여 전송하기 위함이다. 오토-디지털타이저의 애널로그와 디지털 변화부의 분해능은 12bit로서 1/4096의 정도(精度), $1\mu s$ 의 변환속도를 가지고 있다.

측정된 데이터는 오토-디지털타이저에서 증폭되어 저장되고 반복명령에 의하여 오실로스코프 ⑬에 연속출력하여 관측을 용이하게 해준다. 컴퓨터 ①은 오토-디지털타이저 ⑪에 데이터의 읽기 신호와 전자밸브 개폐신호를 외부 트리거(trigger)로서 송신한다. 또한 오토-디지털타이저에 일시 저장된 데이터는 컴퓨터의 전송요구신호에 의하여 IEEE-488(GPIB) 인터페이스를 경유하여 컴퓨터의 하드디스크에 저장되는데, 시간단축·데이터량의 감소를 위하여 램디스크를 이용하고 컴파일링하여 저장된다. 저장이 끝나면 컴퓨터 ①은 RS-232 C 인터페이스를 경유하여 스텝모터 콘트롤러 ⑦에 농도 측정프로브의 이송을 명령하고 스텝모터 ⑥은 이송장치 ⑧에 의하여 농도 측정프로브를 다음의 설정위치로 이동시킨다. 이 동작이 끝나면 컴퓨터는 다시 측정을 명령한다. 이 과정은 정지명령을 주거나 설정해 준 측정위치에서 측정이 끝날때 까지 계속된다.

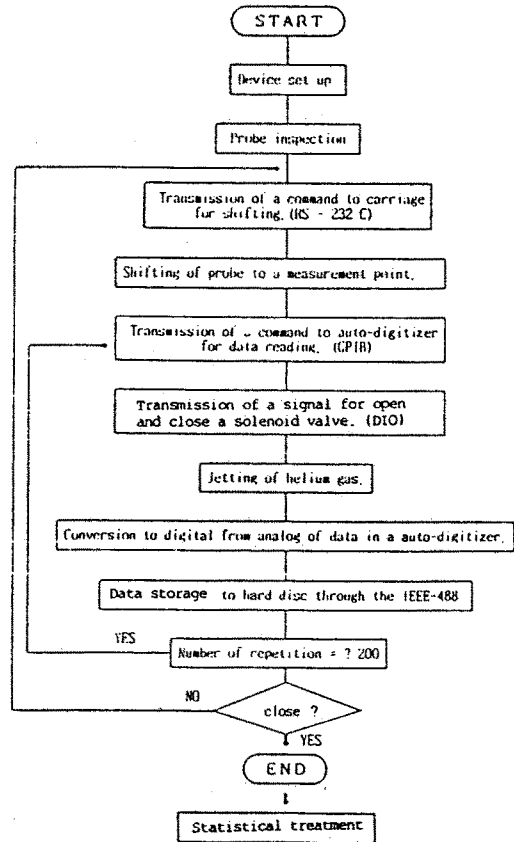


Fig.4 System flow chart for automatic measurement

속된다. Fig.4는 농도의 측정을 위한 시스템의 흐름도이다.

2.2 실험방법

헬륨가스와 공기의 혼합기 순간농도에 대한 공간분포를 알기 위하여 분류 중심축상방향과 반경방향의 농도분포를 측정하였다. 분류의 측정은 분구(噴口)로부터 분류 중심축방향거리 Z=5, 10mm에서 10mm 간격으로 250mm까지, 반경방향으로는 분구로부터 r=0에서 2mm 간격으로 32mm까지 Table 1과 같이 295개의 위치를 선정하여 모든 공간에 대하여 측정하였다. 표 중의 흑점은 상류·중류·하류에서 대표적으로 선정된 위치이다.

헬륨가스의 분사기간은 열선 농도프로브의 응답시간을 고려하여 20ms로 하고 분사종료 후의

분류의 상태를 포착하기 위하여 농도의 측정기 간은 40ms로 하였다. 샘플링 간격은 분사압력, 가스의 소비, 분사지연기(retarder)의 성능을 고려하여 40μs로 하였는데 분사시간을 짧게 할수록 샘플링 간격을 짧게 할 수 있다. 헬륨가스의 분사압력은 분류선단 도달거리와 시간경과, 전자 분사밸브의 성능을 고려하여 0.19MPa로 하였다. 열선 농도프로브에서 감지한 헬륨가스와 공기의 혼합기 농도는 정온도형 열선유속계에서 전압으로 출력된다. 이것을 출력농도로 환산하기 위하여 헬륨가스를 0에서 100%(vol %)까지 공기와 혼합하여 헬륨-공기 표준가스(체적비)를 만들고, 표준가스의 농도와 열선유속계의 출력을 나타내는 환산식을 구하여 측정되는 출력전압을 출력농도로 환산하였다.

Table 1 Concentration measuring points.

Distance in the axial direction (mm)	250	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	230	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	210	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	200	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	190	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	180	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	170	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	160	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	150	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	140	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	130	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	120	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	110	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	100	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	90	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	80	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	70	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	60	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	50	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	40	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
30	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
20	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Z	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32						
	Distance in the radial direction (mm)																						

2.3 통계처리

분류의 농도분포는 시간과 더불어 변화하므로 측정공간의 한점에 농도 측정프로브를 위치시키고 헬륨가스를 1회 분사하여 40ms동안의 분류의

변화를 40μs 간격으로 1000회 입력시켰다. 측정 농도는 한곳에서 농도의 평균화가 이루어진다고 생각되는 200회의 분사를 집적하여 각 시각의 평균농도와 표준편차를 구하였다. 즉, 한곳에서 시간변화에 대한 평균농도의 변화를 알기 위하여 i회의 분사에서 분사개시로부터 시간 tms에서의 농도를 Ci(t)%, 분사횟수를 N라 하고, 앙상블(Ensemble) 평균농도 $\bar{c}(t)$, 표준편차 $\sigma(t)$, 분류 출현빈도 $\gamma(t)$, 그리고 변이계수의 시간경과 E(t)를 다음식으로 표시하였다.

$$\bar{c}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i(t) \tag{5}$$

$$\sigma(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [C_i(t) - \bar{c}(t)]^2 \tag{6}$$

$$\gamma(t) = \frac{N'}{N} \tag{7}$$

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\bar{c}(t)} \tag{8}$$

분류의 출현빈도 $\gamma(t)$ 는 헬륨가스를 N회 분사시킬 때 분류가 임의의 시간 및 위치에서 프로브의 선단에 존재하는 횟수 N'의 N에 대한 비율이며, 표준편차와 평균농도에 의하여 변이계수 E(t)의 시간변화를 표시하였다. 변이계수가 작을수록 측정값들이 평균에 가깝게 분포하고 있음을 의미한다.

3. 실험결과 및 고찰

분류의 중심축방향 거리 Z=20mm에서 측정한 분류의 앙상블(ensemble) 평균농도(\bar{c}), 표준편차(σ), 그리고 출현빈도(γ)의 분사 개시점으로 부터의 시간경과를 Fig5와 같이 나타내었다.

헬륨가스와 공기의 혼합기 농도는 헬륨가스를 분사한 후 분류의 선단이 8ms 부근에 도달했을 때 증가가 시작되어 급격히 상승한다. 평균농도는 급격한 상승 이후 거의 일정한 값을 가지게 되

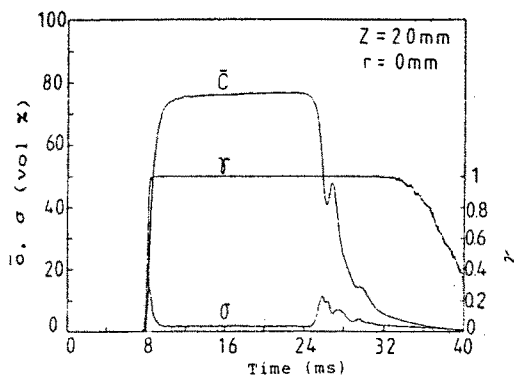


Fig.5 Average concentration(c), deviation(σ) and frequency(γ) with the lapse of induction time.

는데 이것은 시간의 경과와 더불어 분류가 정상류영역이 되었음을 의미하고 25ms 부근에서 감소하기 시작한다. 이것은 간헐적 단발분사에 따른 분류의 끝부분이 이 지점에 도달하였음을 나타낸다. 그러나 이후의 농도는 단순 감소가 아닌 26ms 부근까지 감소하고 27ms 부근에서 다시 증가하는 약간의 변동을 보이면서 감소하다가 소멸한다. 이것은 프로브의 위치가 달라도 일어나는 현상으로 솔레노이드 밸브를 갑자기 닫음에 따라 분류의 끝부분이 전체분류에 비하여 상대적으로 일시적 지연이 있음을 의미한다.

분류의 선단과 후단에서 표준편차의 값이 크며 정상류영역에서는 값이 낮고 일정함을 보이는데 이것은 분류의 선단과 후단에서 분사기체의 주위공기와의 혼합이 활발하게 이루어져 난류특성이 크기 때문으로 생각된다.

3.1 정상류영역에서의 농도분포

분사밸브가 개폐신호를 받고 밸브를 열때까지의 분사개시 지연시간과 축압실의 헬륨가스가 분사노즐 선단에 위치한 프로브에 도달하는데 걸리는 시간을 합하여 경과한 시간(7.2ms)이 실제 노즐로부터의 분사 개시점($t=0$)이 된다. 이 지연시간은 지연기(retarder)에 의하여 조정된다.

분사개시 후 헬륨가스와 공기의 혼합기 농도는 급상승하는데 시간의 경과와 더불어 평균농도 변화에 영향을 주지 않는 시각까지의 구간을 비

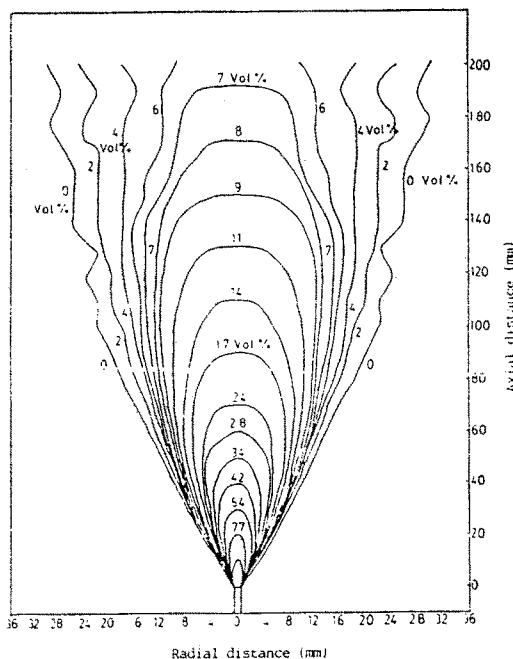


Fig.6 The isometric concentration line of a jet.

정상류영역, 이 시각으로부터 평균농도의 감소가 시작되는 시각까지 정상류영역으로 정의하였다.

분사개시 후 분구(噴口)로부터 기체분류가 성장하여 주위공기와 혼합하는 농도분포를 알기 위하여 정상류영역의 등농도곡선을 Fig.6과 같이 작성하였다. 헬륨분류는 하류로 성장해감에 따라 혼합기 농도의 감소와 더불어 원호형상의 등농도선을 만들며, 분류선단의 간격은 넓어지면서 불안정하고 주위공기와의 경계부에 가까울수록 농도의 희석이 크고 불안정하다.

분류의 외형적이 형상은 디젤 스프레이를 측정한 國吉¹²⁾, 河¹³⁾등의 화상촬영에 의하여 작성된 자유분무의 형상과 비슷하다.

분류 중심축상의 농도를 계산하기 위하여 Schlichting¹⁴⁾의 축대칭 자유분류의 축방향 속도식(9)를 이용하였다.

$$V = \frac{Q_1}{Z(1+b\eta^2)^2} \tag{9}$$

여기서 Q_1 은 속도상수이며, 직교축변수(ortho-

gonal variable) η 는 분류의 반경방향의 거리와 중심축방향의 거리의 비이다. 분류중심축상($\eta=0$)에서의 속도는 식 (11)과 같다. 그러므로 무차원 속도는 식 (12)로 된다.

$$\eta = \frac{r}{Z} \quad (10)$$

$$V_0 = \frac{Q_1}{Z} \quad (11)$$

$$\frac{V}{V_0} = \frac{1}{(1+b_1\eta^2)^2} \quad (12)$$

농도분포도 이와 유사하다고 가정하여 헬륨분류의 등농도분포에 대한 실험식을 만들었다.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{(1+b_2\eta^2)^2} \quad (13)$$

$$C_0 = \frac{Q_2}{Z} \quad (14)$$

여기서 Q_2 , b_2 는 상수이고, C_0 는 분류중심축상의 농도이다. 먼저 중심축농도 $C_0(Z)$ 를 구한 다음 b_2 를 구하였다. C_0 는 식 (14)와 같으며 V_0 는 노즐 끝($Z=0$)에서 무한대가 되나 C_0 는 1이 되고, 또한 노즐의 크기에서 이론적인 조건(무한히 작은 구경)을 만족시킬 수 없기 때문에 이 식은 그대로 사용할 수 없다. 그러므로 Z_1 만큼의 분류의 분출정점의 이동(shifting)을 고려하여 식 (15)로 바꾸어 사용한다. 분구로부터 헬륨가스를 분출할 때 분구의 크기가 다르고 유한(有限)하기 때문에 이론적인 분출정점의 위치가 실제적인 정점의 위치와 다르다. Z_1 은 분류중심축의 농도를 계산할 때 이론상의 분류중심축거리 Z 에서 조정해 주어야 할 거리이다.

$$C_0 = \frac{Q_2}{Z-Z_1} \quad (15)$$

식 (15)의 양변에 \ln 을 취하면

$$\ln C_0 = \ln Q_2 - \ln(Z-Z_1) \quad (16)$$

식 (16)이 된다. $\ln C_0$ 는 $\ln(Z-Z_1)$ 에 대하여 직선적으로 변화한다. 실험 데이터에 의하여 최소자승법으로 Q_2 , Z_1 을 구하면 분류중심축농도 C_0 는 다음식으로 된다.

$$C_0 = \frac{1360}{Z-7.5} \quad (C_0: \text{Vol}\%, Z: \text{mm}) \quad (17)$$

$$C_0 = \frac{1400}{Z_1} \quad (18)$$

Fig.7은 C_0 의 분포를 나타낸 것이며 실선은 분류의 분출정점의 이동(shifting)을 고려하지 않고 하류에서 실험결과와 잘 맞도록 식 (18)에 의하여 그린 것이다. 이론적인 농도 식 (18) C_0 의 값이 분류의 하류에서는 분류의 분출정점의 위치를 고려하지 않은 실험적인 농도 식 (17) C_0 의 값과 일치하므로 Q_2 의 값을 1400으로 하였다. 그러나 상수 Q_2 의 값이 1400이 되어야 하는 명확한 입증은 어렵다.

파선은 분출정점의 이동을 고려한 식 (17)을 그린 것으로 분구의 부근 $Z=30\text{mm}$ 위치에서 7.1%의 차이가 있으나 $Z=800\text{mm}$ 위치에서는 1.9%의 차이가 있으며 하류가 갈수록 실험적인 값 식 (17)과 이론값 식 (18)이 일치한다. 그리고 분류의 중심농도는 상수를 Q_2 로 하여 반비례한다.

식 (17)로 부터 입구효과(entrance effect)에

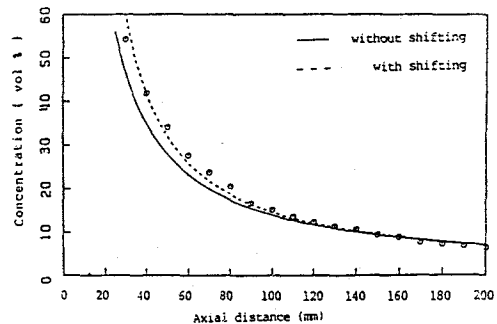


Fig.7 Concentration vs. axial distance.

의하여 $C_0=100\%$ 로 되는 거리를 구하면 $Z=21.1$ mm이다. 즉, $\leq Z \leq 21$ 범위는 분류의 핵이 되는 지역(potential core region)임을 알 수 있다. 이것은 본 실험장치의 분구의 직경이 1.6mm인 경우이다.

3.2 무차원 농도분포

분류중심축방향거리 Z 와 반경방향거리 r 을 변화시켰을 때 임의의 위치의 농도를 알기 위하여 무차원 농도식을 만들고 분류의 분사각을 계산하였다.

분류중심축방향의 거리와 반경방향의 거리가 멀어짐에 따라 분류의 분출점의 이동(shifting)은 분류중심축에서의 분출점의 이동거리 Z_1 과 다르고 Z_2 가 되어야 한다. 직교축변수 η 를 X 축으로 하여 실험데이터를 모아보면, Z_2 에 따라 농도의 밀집도가 다르다. Z_2 를 1mm 간격으로 변화시켜 그려본 결과 $Z_2=-20$ 에서 가장 좋은 밀집도를 보였다. Schlichting의 자유분류이론에 실험 데이터를 맞추려고 하였으나 직교축변수가 큰 지역에서는 맞지않음을 알았다. 그러므로 실험에서 얻어진 데이터를 잘 대변할 수 있는데 테일러 급수를 실험식으로 사용하였다. 직교축변수식 (10)은 (19)로 변형한다.

$$\eta = \frac{r}{Z-Z_2} \tag{19}$$

무차원 농도식 (13)에서 상수 b_2 값을 구하기 위하여 η^2 에 대하여 테일러 급수로 전개하면 식 (20)으로 된다.

$$\frac{C}{C_0} = 1 + A\eta^2 + B\eta^4 + C\eta^6 + \dots \tag{20}$$

식 (20)에서 첫 3개항만 취하고 실험데이터를 적용하여 상수 A, B를 최소자승법으로 구하면 식 (21)이 된다.

$$\frac{C}{C_0} = 1 - 57\eta^2 + 747\eta^4 \tag{21}$$

이론식 (13)의 상수 b_2 를 구하기 위하여 $r=0$, 즉 $\eta=0$ 에서 식 (21)과 식 (13)의 2계 도함수값을 같게 놓으면, $b_2=28.5$ 가 얻어진다.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{(1+28.5\eta^2)^2} \tag{22}$$

또한 Gauss 함수로 실험결과를 나타내기 위하여 같은 방법으로 $\eta=0$ 에서 2계 도함수값을 같게 하면 식 (23)이 된다.

$$\frac{C}{C_0} = \exp(-57\eta^2) \tag{23}$$

Fig8은 직교축변수(orthogonal variable) η 를 X 축, 무차원농도값 C/C_0 를 Y 축으로하여 실험결과를 나타내는 무차원 농도분포의 밀집도 식 (21)을 Schlichting의 이론에 따른 곡선 식 (22)과 Gauss 함수로 표시되는 곡선 식 (23)에 비교한 것이다.

Schlichting의 이론에 따른 곡선보다는 Gauss 함수가 실험결과에 더 잘 맞으나 이들 모두 직교축변수 η 가 큰 지역에서는 실험결과와 크게 차이나 난다. 직교축변수 η 가 큰 지역에서 Schlichting의 속도식을 이용하여 농도를 구하는 이론식 식 (22)과 실험결과를 나타내는 농도식 식 (21)이 맞지 않는다. 이것은 난류영역에서 측정된 이상불 평균농도와 속도가 일치할 수 없기 때문에 생각된다. 이것은 거의 모든 형태의 자유분류에서

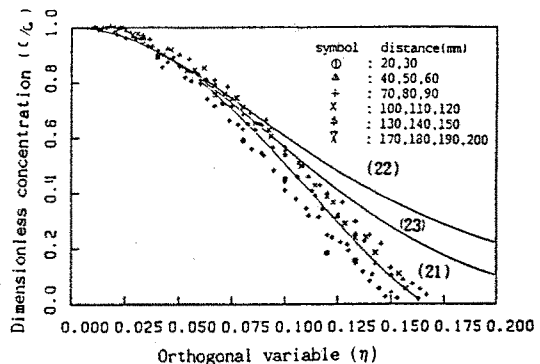


Fig.8 Dimensionless concentration vs. orthogonal variable.

볼 수 있는 것으로서 난류모델등과 관련하여 집중 연구되어야 할 요소라고 생각된다.

또한 식 (22)로부터 분사각 α 를 계산하였다. $C/C_0=0$ 이 되는 직교축변수 η 를 구하면 0.17이 되고, $\tan \alpha=0.17$ 로 부터 α 는 9.7도가 얻어진다. 이 값은 Fujimoto¹⁵⁾등이 모형연소실내로 분사한 디젤 스프레이에서 얻어진 분무각과 거의 같은 값이다.

3.3 분무선단 도달거리의 시간함수

분류중심축상의 거리 $Z=20\text{mm}$ 에서 10mm 간격으로 200mm까지의 각각의 위치에서 분류의 출현빈도가 50%로 되는 시간으로부터 분류의 도달거리를 시간함수로 표시하였다. Schlichting에 의하면 분류중심속도(centerline velocity)는 분류 중심축 거리 Z 의 역수가 비례한다. 즉 $Z \propto \sqrt{t}$ 로 표시할 수 있다. 그러나 입구효과에 의하여 이론적인 분사개시점의 시각과 노즐에서 출발하는 실제 분사개시점의 시각은 차이가 날 수 있으므로 Schlichting의 식은 t_0 만큼의 시간적 지연을 고려하여 t 를 $t-t_0$ 로 대체하고 자유분류이론에 의한 분류도달거리의 시간상수 P 를 구하면 분류중심축 거리를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$Z=P(t-t_0)^{1/2} \quad (24)$$

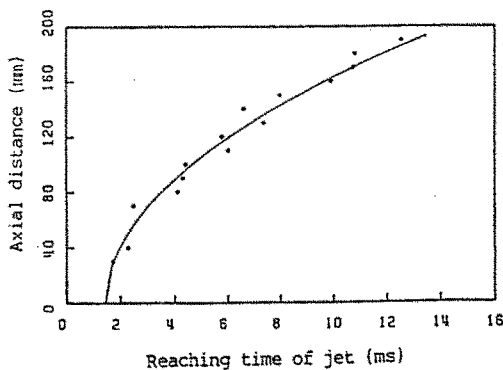


Fig.9 Reaching distance vs. reaching time of jet.

여기서 P 는 자유 분류이론에 의한 분류 도달거리의 시간상수이며 최소자승법으로 P 와 t_0 를 구하면 식 (25)와 같다.

$$Z=55.78(t-1.46)^{1/2} \quad (25)$$

Fig.9는 실험결과와 이론식 식 (25)을 비교한 것이다. 곡선은 분류 중심축상에서 분류의 도달시간을 이론식으로 그린 것이며, 각 점은 실험값을 나타낸 것으로 대체로 잘 일치하고 있으나 이론곡선과 2~5%의 차이가 있다.

3.4 분류의 혼합특성

노즐로부터 분사된 헬륨가스가 주위공기와 혼합하는 양은 그 지역에서의 난류효과에 의해 정해진다. 본 연구에서는 난류혼합의 효과를 식 (8)과 같이 표준편차를 평균농도로 나눈 변이계수(variation factor)의 크기로 조사하였다. Fig.10은 분류의 반경방향의 거리 $r=0, 6, 10\text{mm}$ 위치에서 분류중심축방향 거리 Z 의 변이계수의 변화를 나타낸 것이며, Fig.11은 분류의 중심축반향의 거리 $Z=20, 80, 170, 190\text{mm}$ 위치에서 분류의 반경방향의 거리 r 의 변이계수의 변화를 나타낸 것이다.

변이계수는 분사개시 직후와 시간의 경과와 더불어 분류의 선단부(先端部)에서 그 값이 최대이며, 정상류 영역에서 거의 일정한 값을 유지하고, 분류의 후류에서 약간 상승하다가 소멸한다. 후류의 변동은 상류인 $Z=80\text{mm}$ 에서 가장 크다.

분류의 선단에서 변이계수가 큰 값을 갖는 시간은 하류로 갈수록 그리고 중심축에서 멀어질수록 길어지는 것을 알 수 있는데, 이것은 혼합영역이 그 만큼 넓어지는 것을 입증하는 것이다.

변이계수의 값이 최대로 되는 위치에서의 시각과 비정상류 영역이 정상류 영역으로 천이하는 위치의 시각을 분류의 중심축 방향의 거리에 대하여 Fig.12와 같이 나타내었다. 이 천이점(transition point)은 시(時)계열 농도가 일정하게 되기 시작하는 위치이다.

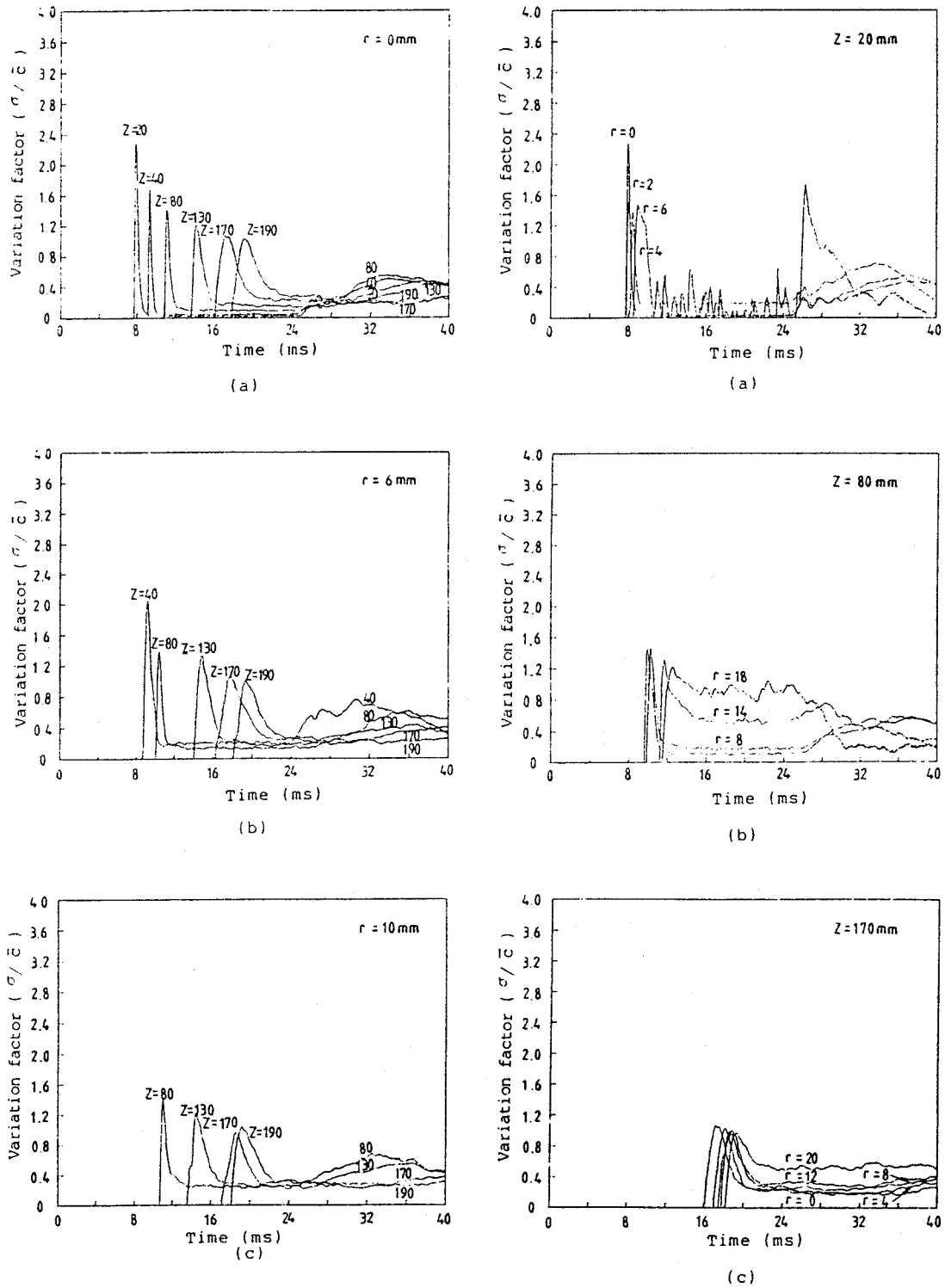


Fig.10 Variation factor with the lapse of injection time in the radial direction.

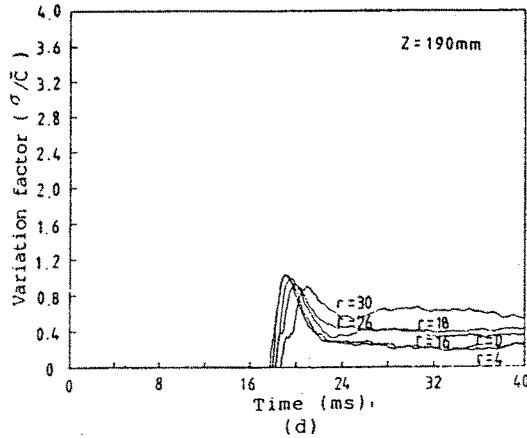


Fig.11 Variation factor with the lapse of injection time in the radial direction.

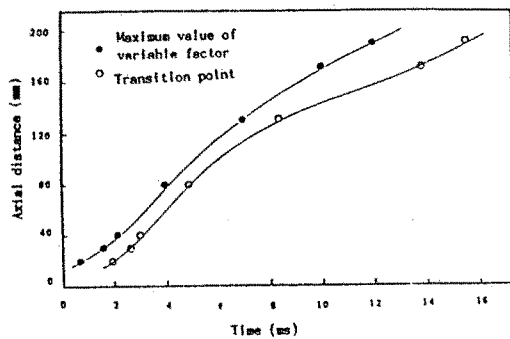


Fig.12 The gaps between the maximum value of variable factor and transition point vs. the lapse of time on the axial of jet flow.

이 시각의 간격은 분사 초기인 $Z=20\text{mm}$ 에서는 약간 길고, $Z=40\text{mm}$ (분류의 중심축방향 거리의 20% 범위)에서 가장 짧아졌다가 하류로 감에 따라 다시 길어진다. 분사초기에 변이계수의 최대값과 천이점의 시각간격이 긴 것은 분사초기에 분류의 운동량 부족과 주위공기의 초기저항등에 의한 난류변동 때문이며, 하류로 감에 따라 이 시각간격이 다시 길어지는 것은 분류선단에 존재하는 주위공기의 와(渦)운동, 상류에서 활발한 주위 경계로부터 주위공기의 유입(entrainment) 등 헬륨가스의 혼합영역이 넓어지면서 난류혼합이 광범위하게 일어나기 때문이다.

4. 결 론

내연기관의 새로운 연료로 예상되는 수소의 연소특성을 알기위한 기초연구로서 수소와 물성이 유사한 헬륨가스를 정지(靜止)대기중에 분사하여 주위공기와 혼합하여 헬륨 기체분류의 정상적 비정상적 거동을 고찰한 실험결과는 다음과 같다.

- 1) 난류영역에서의 양상불 평균농도를 알 수 있는 실험식 식 (21)을 구하였으며, 분류의 중심축상에서 헬륨가스의 농도는 분사노즐로부터의 거리에 반비례하여 감소한다. 이것은 Schlichting의 자유분무 이론과 일치한다.
- 2) 무차원 농도분포에 관한 실험식은 식 (22)와 같이 표현되며 이 식으로부터 분사각을 구하였다. 무차원 농도분포에 있어서 Schlichting의 분무이론은 분류 중심축에 대하여 반경방향으로 멀어질수록 잘 맞지 않음을 알았다. 이에 관한 이론적 연구가 요청된다.
- 3) 분류선단부의 도달거리를 시간에 대한 함수로 나타낸 실험식은 식 (25)와 같으며 Schlichting의 자유분무 이론과 일치한다.
- 4) 분류의 변이계수로부터 헬륨가스의 혼합특성을 분석한 결과 분류의 선단에서 혼합이 가장 활발하며, 비정상류에서 정상류로 천이하는 시간간격은 분류의 끝부분이 가장 짧고 하류로 갈수록 길어져서 혼합지역이 넓어지는 대신 그 강도가 약해진다.

참 고 문 헌

1. H. F. Ricardo : Further note on fuel research, Report of empire motor fuels committee ; Proc. IAE. Vol.18, pp.1923~1924
2. A. F. Burstall : 1927, Experiments on the behavior of various fuels in high speed internal combustion engine ; Proc. IAE. Vol.22, P.358
3. R. A. Erren and W. H. Campbell : 1933, Hydrogen : A commercial fuel for internal combustion engines and other purposes, Journal of the inst-

- institute of fuel, Vol.6, No.29
4. G. A. Karim and M. E. Taylor : Hydrogen as a fuel and the feasibility of a hydrogen-oxygen engine, SAE 730089
 5. J. G. Finegold and W. D. Van Vorst : 1974, Engine performance with gasoline and hydrogen ; A comparative study, Presented at the hydrogen economy(Miami) energy conference.
 6. 高橋三餘 : 非定常噴流의 實驗的 研究(ヘリウム噴流について)機講論 790-15, p.174
 7. 田邊秀明, 反橋, 鈴木, 藤本, 佐藤 : 非定常噴流에 關する 實驗的 研究(濃度의 確率密度分布), 日本機械學會論文集, 49-448, p.2879
 8. 田邊秀明, 反橋, 河鐘律, 藤本, 佐藤 : 非定常噴流에 關する 實驗的 研究(噴流內의 濃度 · 流速 · 靜壓分布), 日本機械學會論文集, 51-467, p.2235
 9. G. L. Brown and M. R. Rebollo : A small fast-response probe to measure composition of a binary gas mixture, AIAA J. 1972-5 p.649
 10. 大西, 田邊, 三品, 藤本, 佐藤 : 高速應答熱線濃度計의 實用化 とその應用, 日本設計制度學會講演論文集, 1979-1, p.75
 11. Tanabe, ohnishi, Fujimoto and Sato : Experimental study of the transient hydrogen jet using a fast response probe, Int J. Hydrogen energy, vol.7 1982-12
 12. 國吉光 : デイゼル噴霧의 性狀에 關する 研究, 慶應義塾大學 大學院 工學研究科 博士論文, 1977.
 13. 河鐘律 : デイゼル噴霧의 形成およびその周圍氣體의 流動と着火遅れとの關係에 關する 研究, 慶應義塾大學院 工學研究科博士論文, 1984.
 14. H. Schlichting : Boundary-layer theory, McGraw-Hill, Inc, 1979.
 15. H. Fujimoto, H. Tanabe, H. Kuniyoshi and G. T. Sato : Investigation on combustion in medium speed marine diesel engines using model chamber, Proc. 15th CIMAC, (1983-6), pp. 1471~1490.