

공기밸브형 맥동연소 시스템의 안정성 및 성능특성에 관한 연구

임 광 렬*

A Study on Stability and Performance Characteristics in Aero - Valved Pulsating Combustion System

K. R. Lim

Key words : Pulsating combustion(맥동연소), Flammability limit(가연한계), Operating frequency(작동주파수), Volumetric efficiency(체적효율), Turn down ratio(턴다운비)

Abstract

The experimental study was carried out to investigate the stability and the performance characteristics of the aero - valved pulsating combustion system with maximum operating capacity of 60KW.

The effect of geometry of combustion system on the stable condition, the flammability limit, the total pressure oscillation amplitude, and the operating frequency can be identified, and the maximum turn - down - ratio is obtained up to 3.3.

The total pressure oscillation amplitude can be controlled by tuning the length of the air inlet pipe. The empirical equation with which the operating frequency can be approximated is proposed and the discrepancy is within 5 %.

The volumetric efficiency is identified to be one of the important parameters determining the upper flammability limit and the maximum value of which is approximately 22 %.

1. 서 론

맥동연소는 종래의 연속식 연소방식과는 다르며, 작은 공간에서 연료와 공기의 혼합기를 순간적으로 연소시켜 그 팽창압력으로 연소가스가 배출되고, 배출관성에 의해 연소실내에 부압이 형성되

어 새로운 연료와 공기가 흡인되고, 그 혼합기를 재연소시키는 사이클을 연속적으로 반복하는 일종의 자율연소의 특징을 가지고 있다. 이처럼, 맥동연소 결과 생기는 압력의 변화를 이용하여 연소 생성물이나 신기의 출입을 자발적으로 제어할 뿐만 아니라 강력한 배출능력으로 인해 기동시 이외

* 정회원, 연암공업전문대학

는 연소용 공기 및 연소가스 배출용 송풍기가 불필요하며, 고속맥동연소가스에 의한 열전달율의 향상, 고부하연소, 저NOx 등과 같은 장점을 갖고 있는 반면, 압력맥동으로 인한 진동소음이 크다는 문제점도 있다.

맥동연소기는 연소실 상류측에 위치하는 공기 유입부에 역지밸브의 유무에 따라 기계밸브형과 공기밸브형으로 대별된다. 기계밸브형에 대해서는 안정된 맥동연소의 실현이 비교적 쉽기 때문에 지금까지 상용화된 대부분의 맥동연소기에 채용되어 왔으며, 이론 및 실험적인 연구가 많이 이루어져 왔지만, 작동주파수에 해당하는 횡수로 밸브의 닫힘과 열림 작용에 의한 밸브재료의 피로파괴 및 내구성의 문제등 밸브수명이 제한적이라는 일반적인 단점이 있다. 반면, 공기밸브형은 연소실로의 공기의 유입은 원활히 이루어지고 연소가스의 역류는 강한 저항을 받도록 하는 공기역학적 개념의 공기유입관의 형태이므로 가동부가 없어서 연소기의 수명이 반영구적이라는 최대의 장점을 갖는다. 그러나, 연소가스의 역류를 완전히 방지할 수는 없고, 기하학적 형상변화에 매우 민감하고 안정된 맥동연소의 실현이 어렵다는 문제점때문에 상품화의 장애요인이 되고 있다.

지금까지의 공기밸브형 맥동연소기에 관한 연구동향을 보면, 1909년 Marconet에 의해 처음 공기밸브의 개념을 도입한 이래, Muller¹⁾는 곡물건조용으로, Belter²⁾는 고체연료의 건조용으로, Tamburello³⁾등은 음식물의 건조용으로, Kentfield⁴⁾등은 가솔린연료를 사용한 간이예열용⁵⁾, 가스터어빈용⁶⁾, 다관형의 공기유입관에 의한 장치의 소형화⁷⁾, 한쌍의 연소기를 역위상으로 작동시키는 방법으로 소음의 저감화에 관한 연구⁸⁾등을 수행하였으며, Rehman⁹⁾이 추력성능에 관한 최적화에 대해서 연구하는 등 주로 응용적 측면의 연구가 주류를 이루어 왔다. 기초연구로는, Winiarski¹⁰⁾와 Cronje¹¹⁾가 압력 및 속도맥동을 예측하기 위한 이론연구를 수행하였으나 정량적 예측에는 불충분하고, Bogdan¹²⁾이 연소특성에 관한 실험을 하는 등 일부의 연구결과가 있을 뿐이다. 저자들은 이런점에 착안하여 기초연구로서 기하학적 형상변화가 맥동연소의 안정성에 미치는

영향 및 동적 특성에 관한 연구¹³⁾와 맥동연소의 메카니즘을 규명하기 위한 온도 및 연소특성에 관한 연구¹⁴⁾를 수행하였다.

본 연구에서는, 최대용량이 60KW 정도의 프로판가스 사용 공기밸브형 맥동연소시스템에 대해 前 연구¹³⁾에서 실험하지 못한 부분인 기하학적 형상 중 공기유입관의 길이, 연소실체적, 배기관 형상이 맥동연소의 안정성 및 가연범위, 그리고 연소실의 압력맥동에 미치는 영향을 추가로 조사하고, 작동주파수의 근사치를 예측할 수 있는 실험식을 수립, 보완하고, 선택된 형상에 대한 추력성능의 측정결과를 타연구자들의 결과와 비교하고자 한다. 그리고, 大島遊博¹⁵⁾에 의해 기계밸브형 맥동연소기에 적용한 제척효율의 개념을 공기밸브형에 도입하여 최대연소부하의 예측가능성을 검토하고자 한다.

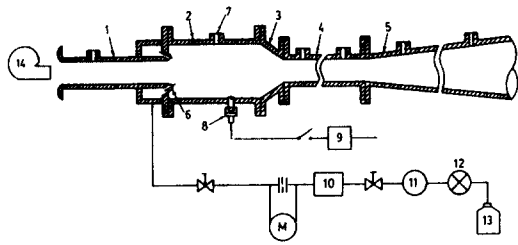
2. 실험장치 및 실험방법

Fig.1은 본 연구를 위해 제작된 실험장치도를 나타낸다. 본체는 실린더형의 공기유입관과 연소실, 축소관형의 연소후미실, 실린더형의 길이조절배기관 및 확대관형의 배기관으로 구성되고, 여기에, 연료공급장치, 점화용 스파이크 플러그, 시동용 송풍기가 설치되어 있다. 연료는 일반 가정용 프로판가스를 사용하였다.

실험방법은, 스파이크 플러그 및 송풍기를 작동시킨 후, 연료를 분사노즐을 통해 연소실내로 공급하면 폭발연소와 함께 발진이 시작되고, 오실로스코우프를 통해 정상적인 발진이 확인되면 스파이크 및 송풍기의 구동을 정지시키고, 연소가 전체가 충분히 가연된 후 측정을 행하였다.

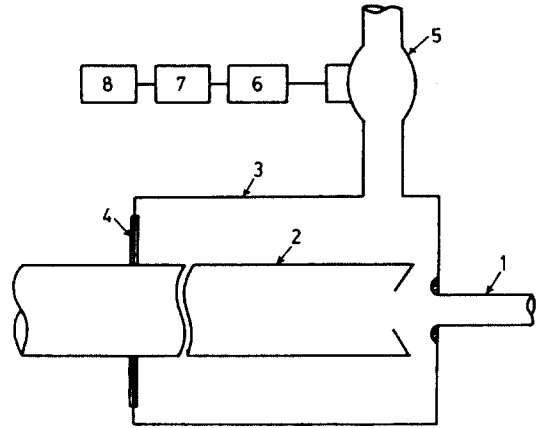
Fig.2는 압력맥동의 측정계통도를 나타낸다. 맥동압력은 스트레인 게이지형 수냉식 압력센서(KYOWA PE 5K RMT)에 의해 수신되고, 이 신호를 시그널 콘디셔너(KYOWA CDV-110A)로 증폭시켜 오실로스코우프로 신호를 관찰하면서 데이터 리코오더(TEAC R-260)에 수록시킨 후, FFT 신호분석기(IWATSU SM-2100B)로 분석한 결과를 디지털 플로터에 기록시켰다.

Fig.3은 前 연구¹³⁾에서 고안된 시간평균적인 공



1. Air Inlet Pipe
2. Combustion Chamber
3. Combustion Chamber Rear Section
4. Extension Sleeve
5. Tailpipe
6. Fuel Nozzle
7. Pressure Tap
8. Spark Plug
9. Step Up Transformer
10. Fuel Cushion Tank
11. Gas Meter
12. Pressure Regulator
13. Fuel Bomb
14. Fan

Fig.1 Schematic diagram of the aero-valved pulse combustion system



1. Air Inlet Pipe
2. Back Flow Guide
3. Surge Tank
4. Rubber Plate
5. Laminar Air Flow Meter
6. Differential Pressure Transducer
7. Differential Pressure Amplifier
8. X Y Recorder

Fig.3 Measuring system of air inflow rate

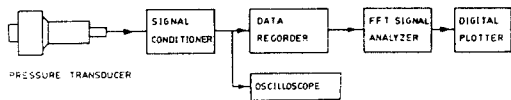


Fig.2 Measuring system of pressure fluctuation

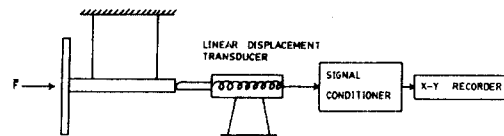


Fig.4 Schematic diagram of a thrust meter

기유입량을 측정하기 위한 장치도이다. 공기 유입관을 통한 연소가스의 역류를 역류안내관을 통해 대기로 방출되도록 했으며, 서어지 탱크는 연소기 본체와 공기측정 유로와의 음향학적 분리와 공기 유동의 맥동을 줄이는 역할을 한다. 유입공기량의 측정에는 증류유량계를 사용하였다.

Fig.4는 시간평균 추력의 측정계통도를 나타낸다. 추력을 받는 판은 한변의 길이가 300mm, 두께가 5mm인 스테인레스판이며, 이 판을 지탱하는 봉은 한쌍의 피아노선에 의해 매달려 있고, 변위량이 선형변위변환기에 의해 전압으로 변환되고 이 신호를 시그널 콘디셔너로 증폭시켜 X-Y 리코오더에 의해 기록시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 맥동연소의 안정성

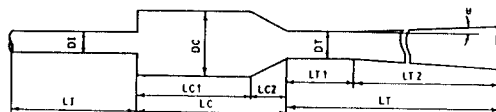
前 연구¹³⁾에서 맥동연소의 기하학적 형상중 공기유입관 직경, 배기관 길이가 맥동연소의 안정성 및 가연범위에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구에서는 공기유입관 길이, 연소실의 체적, 배기관 형상의 영향을 추가로 실험하였다.

Table 1은 前 연구¹³⁾와 본 연구의 결과를 종합적으로 정리한 것이다. 공기유입관 길이(LI)의 영향을 보면, 전 실험범위의 공기유입관 길이에 대해 안정된 맥동연소가 발생하지만, LI가 110 - 170mm 사이에서는 턴다운비가 3.0 - 3.2로서 거의 변화 없이 가연범위가 넓은 반면, LI가 185-

Table 1 Stability and flammability limit for the aero valved pulsating combustor

Geometric Conditions (Unit : mm)		Combustor type	Flammability limit				T. D. R	Comments
			Lower Limit		Upper Limit			
			F. F. R	ϕ	F. F. R	ϕ		
DT=30 LT1=295 LT2=813 $\theta=1.3^\circ$ LI=140 LC1=127	DI=20	B					Unstable	
	DI=22	C	0.93	0.41	2.03	0.65	2.2 Stable	
	IE=25	A	0.71	0.51	2.30	0.74	3.2 "	
	DI=28	D	0.81	0.37	2.30	0.74	2.8 "	
	DI=31	E					Unstable	
	DI=35	F					Slightly Unstable	
DT=30 LT1=295 LT2=813 $\theta=1.3^\circ$ DI=25 LC1=127	LI=110	G	0.81		2.45		3.0 Stable	
	LI=125	H	0.71		2.30		3.2 "	
	LI=140	A	0.71	0.51	2.30	0.74	3.2 "	
	LI=155	I	0.71		2.30		3.2 "	
	LI=170	J	0.71		2.30		3.2 "	
	LI=185	K	0.81		2.03		2.5 "	
	LI=200	L	0.81		1.53		1.9 "	
	LI=215	M	0.93		1.43		1.5 "	
DI=25 LT1=295 LT2=813 $\theta=1.3^\circ$ LI=140 LC1=127	DT=20	N					No Combustion	
	DT=25	O	0.71		2.30		3.2 Stable	
	DT=30	A	0.71	0.51	2.30	0.74	3.2 "	
	DT=35	P	0.71		2.03		3.2 "	
DI=25 DT=30 LT2=813 $\theta=1.3^\circ$ LC1=127	LT1=65	Q					Unstable	
	LT1=90	R					Slightly Unstable	
	LT1=180	S	0.71	0.60	2.03	0.69	2.9 Stable	
	LT1=295	A	0.71	0.51	2.30	0.74	3.2 "	
	LT1=550	T	0.71	0.47	2.30	0.75	3.2 "	
	LT1=845	U					Slightly Unstable	
DI=25 LT=1108 LI=140 LC1=127	LT1=1108	V					Unstable	
	DT=30	W	0.81		1.0		1.2 Stable	
	DT=35	X	0.81		1.0		1.2 "	
DT=30 LT1=295 LT2=813 $\theta=1.3^\circ$ DT=25 LI=140	DT=72	Y	1.0		1.69		1.7 "	
	LC1=97	ZS	0.71		1.85		2.6 "	
	LC1=127	A	0.71		2.30		3.2 "	
	LC1=162	ZL	0.81		2.70		3.3 "	

* Fixed condition : DC = 72.3mm, LC2 = 38mm * F. F. R : Fuel flow rate(Nm³/h)
 * T. D. R. : Turn down ratio(=Upper limit F. F. R./Lower limit F. F. R.)



215mm사이에서는 턴다운비가 1.5 - 2.5로서 가연범위가 좁으며, LI가 길어질수록 가연범위가 급격히 좁아지고 있다.이처럼, 공기유입관 길이가 맥동연소의 안정성에 미치는 영향은 비교적 작지만, 가연범위에는 길이가 길어질수록 민감한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

연소실 체적(LC1에 의해 조절함)의 영향을 보면, 모든 실험에서 사용한 A-형을 기준으로 기준체적보다 작은 ZS-형과 기준체적보다 큰 ZL-형에 대해 실험한 결과 연소실 체적에 관계없이 안정된 맥동연소가 발생하고, 연소실 체적이 커질수록 가연범위가 다소 넓어지고 있으며, 최대 공급연료량이 증가함을 알 수 있다.

배기관 형상의 영향을 보면, 배기관 직경이 일정한 실린더형(W, X, Y-형)일 때 안정된 맥동연소는 얻을 수 있지만, 턴다운비가 1.2 - 1.7정도로서 확대관형(배기관의 형상을 제외한 모든 기하학적 형상치수가 동일한 A-형의 턴다운비는 3.2임)에 비해 가연범위가 대단히 좁을 뿐만 아니라 최대연소량도 작기 때문에 실린더형은 실용적 가치가 없다고 판단된다.

종합적으로 기하학적 형상치수가 맥동연소의 안정성 및 가연범위에 미치는 영향을 정리해 보면, 맥동연소의 안정성에는 공기유입관경, 배기관목직경, 그리고 배기관 길이가 민감한 영향을 미치고, 가연범위에는 공기유입관의 직경 및 길이가 민감한 영향을 미치고 있다.

3.2 맥동연소의 성능

3.2.1 연소실의 압력맥동폭

前연구¹³⁾에서 공기유입관경, 배기관 목직경 및 배기관 길이가 연소실의 압력맥동폭에 미치는 영향을 조사하였다.본 연구에서는 공기유입관 길이와 연소실 체적의 영향에 대한 실험을 추가로 수행하였다.

Fig.5는 공기유입관 길이 및 공급연료량이 연소실의 총압력맥동폭에 미치는 영향을 나타낸다.압력맥동폭은 연료량이 증가함에 따라, 그리고 공기유입관의 길이가 길어질수록 현저히 증가하고 있으며, 그 범위가 25-105KPa 정도로 대단히 넓음을 알 수 있다.

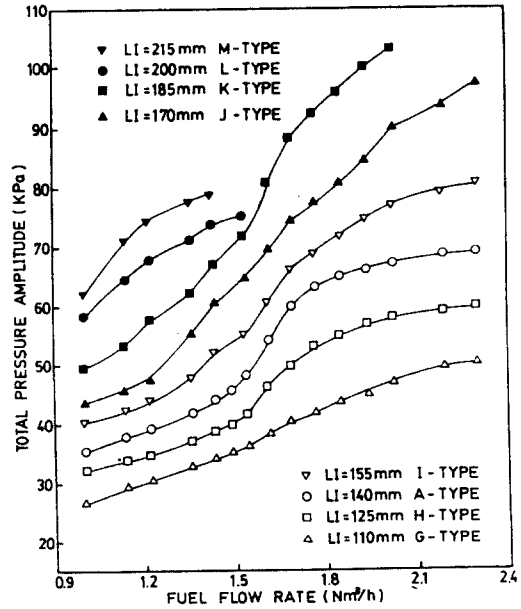


Fig. 5 Influence of air inlet length on total pressure oscillation amplitude

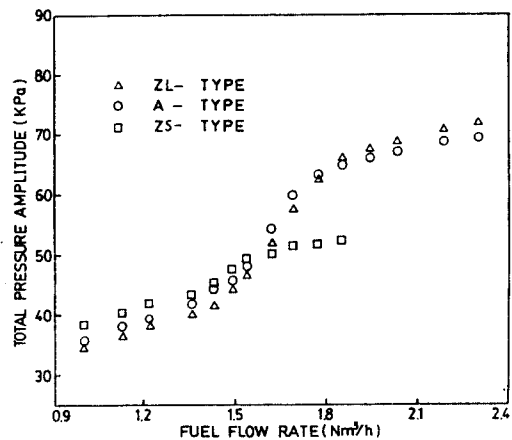


Fig. 6 Influence of combustion chamber volume on total pressure oscillation amplitude

Fig.6은 연소실 크기 및 공급연료량이 연소실의 총압력맥동폭에 미치는 영향을 나타낸다.이 그림에서 보듯이 연소실 크기가 압력맥동폭에 미치는 영향은 비교적 작게 나타나고 있다.

3.2.2 작동주파수

기계밸브형 맥동연소기의 경우에는 연소실 단면적과 배기관 단면적의 비에 따라 1/4파 파이프

이론이나 헬름홀츠공명이론을 적용하여 어느 정도 작동주파수의 근사치를 예측할 수 있다는 연구 결과들이 있다. 그러나, 공기밸브형 맥동연소기의 경우에는 공기유입관의 길이와 배기관 형상의 영향이 추가로 작용하므로 현재로서는 이론적으로 작동주파수의 예측을 위한 연구결과가 없는 실정이다. 그래서 간단한 실험식에 의해 작동주파수를 예측할 수 있다면 연소기의 초기설계단계에서 제한적이지만 효율적으로 이용될 수 있다는 필요성에 의해 실험이 수행되었다.

Fig.7은 前연구¹³⁾에서 행해진 배기관 길이가 작동주파수에 미치는 영향을 나타낸다. 배기관 길이가 같은 조건에서도 그 이외의 기하학적 형상치수 및 연소부하등에 따라 작동주파수는 달라지므로 각 배기관 길이에 대해 작동주파수가 변화될 수 있는 범위로 표시하였다. 작동주파수는 배기관 길이가 길어짐에 따라 거의 선형적으로 감소하고 있다.

Fig.8은 배기관 길이 $LT=1108\text{mm}$, 연소실 길이 $LC=165\text{mm}$ 일 때 공기유입관 길이와 작동주파수의 관계를 나타낸다. 작동주파수는 공기유입관 길이가 길어질수록 거의 선형적으로 감소하고 있으며, 공기유입관 길이가 같은 조건에서는 공급연료량이 많을수록 증가하고 있다.

Fig.9는 공기유입관 길이 $LI=140\text{mm}$, 배기관 길이 $LT=1108\text{mm}$ 일 때 연소실 길이와 작동주파수의 관계를 나타낸다. 작동주파수는 연소실 길이

가 길어질수록 거의 선형적으로 감소하고 있다.

이런 결과로부터, 작동주파수에 큰 영향을 미치는 기하학적 형상치수는 배기관의 길이, 공기 유입관의 길이, 연소실의 길이라는 판단하에 시행착오법에 의해 前 연구¹³⁾에서 얻은 배기관 길이에 의해 작동주파수를 예측할 수 있는 실험식을 수정, 보완

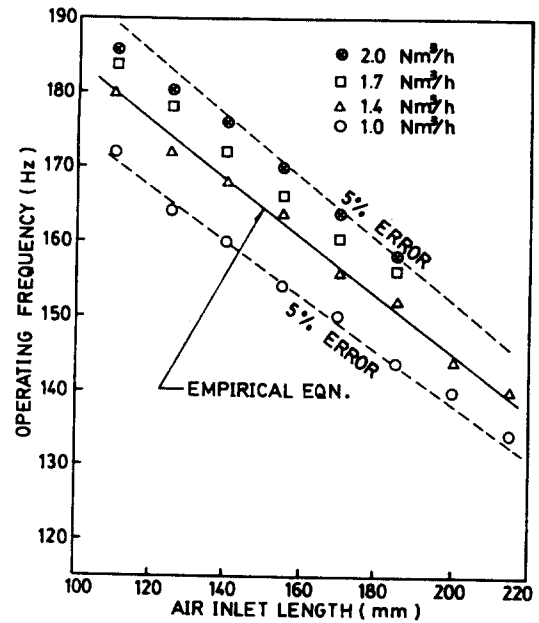


Fig. 8 Air inlet length versus operating frequency

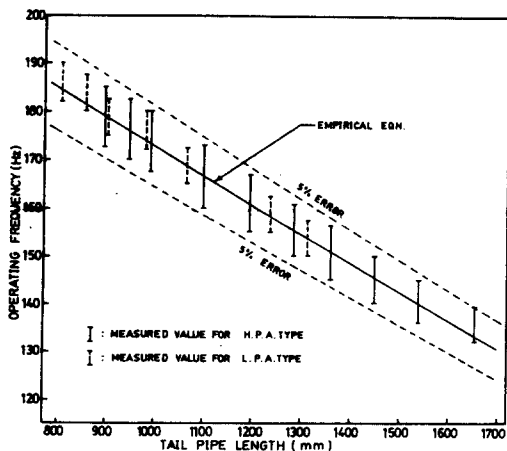


Fig. 7 Tailpipe length versus operating frequency (Ref. 13)

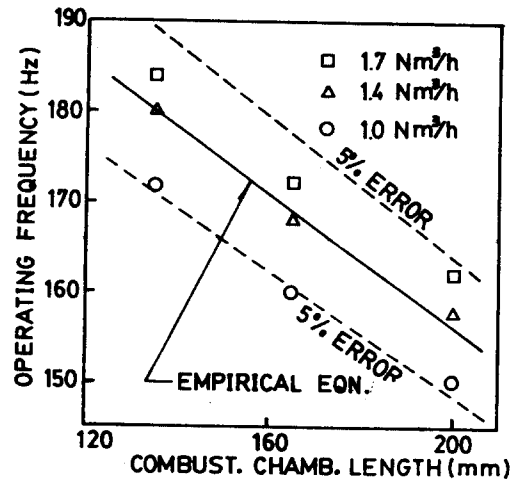


Fig. 9 Combustion chamber length versus operating frequency

하여 다음과 같은 작동주파수에 대한 실험식을 도출하였다.

$$F = 233 - 1.92 \times 10^{-5} \times L_t \times (L_c \times L_a)^{0.8} \quad (1)$$

여기서 F 는 작동주파수(Hz), L_t 는 배기관 길이(mm), L_c 는 연소실 길이(mm), L_a 는 공기유입관 길이(mm)를 나타낸다.

이 식을 적용한 결과를 Fig.7, Fig.8, Fig.9에 나타내었다.이 그림들에서 보듯이 이 실험식은 연소 부하가 작동주파수에 미치는 영향까지를 포함하여 5%이내의 오차로 작동주파수의 근사치를 예측할 수 있음을 알 수 있다.만약 공급연료량 조건에 따라 이 실험식에 보정계수를 적용하면 더욱 정확하게 작동주파수의 예측이 가능할 것으로 사료된다.

3.2.3 추력성능

Fig.10은 가연범위가 넓으면서(T.D.R.=3.2), 모든 실험을 통해 연소실의 압력맥동폭이 2번째로 크게 얻어진 J-형 연소기에 대한 추력성능을 나타낸다.총추력은 공기유입관과 배기관에서의 추력을 합한 값이며, 총추력에 대한 공기유입관에서의 추력비율은 20 - 30% 정도이며, 최대총추력은 21N 정도가 얻어졌다.

Fig.11은 비연료소비율(단위발생총추력당 소비되는 연료량)과 총추력과의 관계를 나타낸다. 비연료소비율은 사용된 연소기형에서 추력이 증가함에 따라 완만하게 감소하여 최소가 되었다가 다시 증가하는 경향을 보여준다.J-형 연소기의 경우 최소비연료소비율은 0.1Nm³/h.N 정도가 얻어졌다.

Table 2에 추력성능 및 최소연료소비율을 중심으로 한 본 연구결과와 Rehman⁹에 의해 정리한 타연구자들의 결과를 비교하였다.본 연구에서 얻어진 최대추력은 타연구자들의 결과 (12 - 47N)의 중간정도의 수준(21N)이고, 최소연료소비율은 타연구자들의 결과(0.1 - 0.17Nm³/h.N)중 가장 좋은 수준(0.1Nm³/h.N)에 해당된다.

3.3 체적 효율

맥동연소기의 체적효율은 1사이클당 연소실에

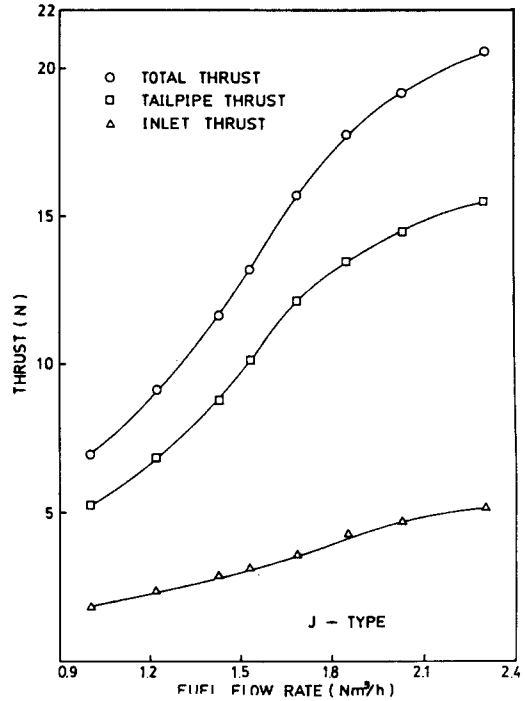


Fig. 10 Thrust performance for J type

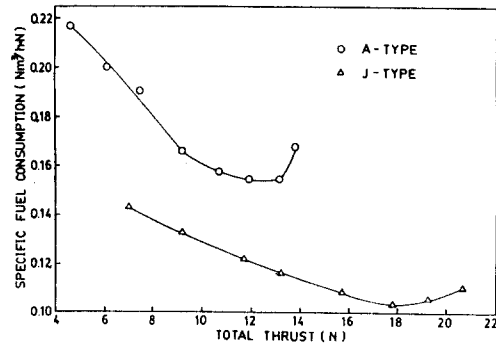


Fig. 11 Total thrust versus specific fuel consumption rate

공급되는 신기의 대기상태의 체적과 연소실체적과의 비로 정의되고¹⁵⁾, 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Y_v = \frac{Q_a + Q_f}{3600FV_c} \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서 Y_v 는 체적효율(%), Q_a 는 공기유입량(Nm³/h), Q_f 는 공급연료량(Nm³/h), F 는 작동주파

Table 2 Performance summary

Combustor	Combustor length	Combustor volume	Maximum thrust	Max. gross fuel consumption	Min. spec. fuel consumption	Maximum combustor loading
	mm	mm ³ × 10 ³	Newton	Nm ³ /h	Nm ³ /h · N	kcal/h · m ³ × 10 ⁶
Pornsiponge (single inlet)	1422	15.4	12	2.1	0.14	9.17
Fernando (four inlets)	871	12.1	13	1.7	0.12	33.73
Hiller (single inlet)	1174	20.0	44	7.3	0.17	87.22
Marzouk (single inlet)	1294	24.7	47	6.4	0.13	61.86
Sadig (four inlets)	1057	21.4	39	4.5	0.11	50.64
Rehman (four inlets)	940	18.1	34	4.1	0.10	53.76
Typical steady flow gas turbine combustor	508	25.0		4.1		33.8
Present(single inlet) (A type)	1413	20.3	14	2.3	0.16	26.9
Present(single inlet) (J type)	1443	20.4	21	2.3	0.10	26.8

수(H₂), V_c는 연소실 체적(m³)이다.

Fig.12 에 여러가지 기하학적 형상에 대해 식(2)에 의해 계산된 체적효율을 나타낸다. 모든 공급연료량 조건에서 공기유입관경이 클수록, 배기관 길이가 길어질수록 체적효율은 증가하고 있는데, 이는 연소실뿐만 아니라 공기유입관 및 배기관이 공기유동공간으로 적용되기 때문이라고 생각되며, 체적효율에 미치는 영향이 공기유입관경보다 배기관길이가 더 크게 작용하고 있다. 이는 공기유입관경보다 배기관길이 변화에 의한 공기유동 유효공간이 더 크게 변화되기 때문이라고 생각된다. 최대체적 효율이 모든 연소기형에 대해 17 ~ 22% 정도로서 大島遊博¹⁵⁾이 기계밸브형 맥동연소기(최대용량이 본 연소기의 1/3 정도임)에 대해 2차 공기를 강제로 공급한 실험에서 얻은 18%와 거의 비슷한 결과가 얻어졌다. 이런 사실에 의해 이 최대체적효율이 맥동연소의 최대연소부하를 결정하는 중요한 인자라고 할 수 있으며, 주어진 형상과 크기의 맥동연소기의 최대연료소비량은 이 최대체적효율에 의해 예측할 수 있다고 사료된다.

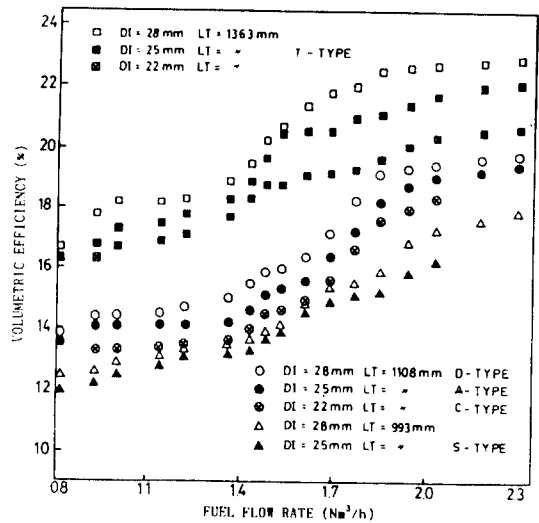


Fig. 12 Volumetric efficiency

4. 결 론

공기밸브형 맥동연소기의 기하학적 형상치수변화가 맥동연소의 안정성 및 가연범위, 연소실의 압

력맥동폭, 작동주파수에 미치는 영향, 그리고 출력성능, 체적 효율에 관한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 맥동연소의 안정성 및 성능은 기하학적 형상치수변화에 민감한 영향을 받으며, 이론적 예측방법이 확립되지 않은 현시점에서 용량이 제한적이기는 하지만 안정된 맥동연소를 얻을 수 있는 형상치수의 한계를 정하였으며, 얻어진 최대턴다운비는 3.3 정도이다.

2) 연소실의 압력맥동폭은 가장 민감한 영향을 미치는 공기유입관 길이에 의해 제어할 수 있다.

3) 본 연구에서 도출해낸 실험식에 의해 작동주파수의 근사치를 5%의 오차이내로 예측할 수 있다.

4) 최대체적효율은 22%내외이며, 최대연소부하를 결정짓는 중요한 변수이다.

5) 얻어진 최대총추력은 21N, 최소연료소비율은 0.1Nm³/h.N으로서 타연구자들의 결과와 비교하여 비교적 좋은 성능을 얻었다.

후 기

이 논문은 1991년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 자유공모(지방대학 육성)과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- 1) J.L.Muller, The development of a Resonance Combustion Heater for Drying Applications, South African Mechanical Engineer, 16(7), 137 - 146(1967)
- 2) J.W.Belter, Review of the Use of Pulsating Combustors for Drying and Conveying, Proc.1st International Symp.of Pulsating Combustion, Univ. of Sheffield, England, Sept. 20 - 23, Paper No. 8(1967)
- 3) N.M.Tamburello, et al., The Development of a Vegetable and Fruit Dehydration Unit with a Pulse-Combustion Chamber, Proc.Symp.on

- Pulse-Combustion Applications, GRI - 82/0009. 2, Atlanta, March 2 - 3, Paper No. 13(1982)
- 4) J.A.C.Kentfield, A New Light - Weight Warm-Air Blower for Rapidly Pre - Heating Cold-Soaked Equipment, ASME Paper No. 77 - WA/HT - 20(1977)
- 5) J.A.C.Kentfield, et al., A Simple Pressure - Gain Combustor for Gas Turbines, J.Eng.for Power, Trans.ASME, April, 153 - 158(1977)
- 6) J.A.C.Kentfield, et al., Performance of Pressure-Gain Combustor without Moving Parts, J.Enèrgy, 4(2), 56 - 63(1980)
- 7) J.A.C.Kentfield, Valveless Pulse Combustors with Multiple Inlets, Proc.Symp. on Pulse - Combustion Applications, GRI - 82/0009.2, Atlanta, March 2 - 3, Paper No. 2(1982)
- 8) B.S.Sran, J.A.C.Kentfield, Twin Valveless Pulse Combustors Coupled to Operation in Antiphase, Proc.Symp. on Pulse - Combustion Applications, GRI - 82/0009. 2, Atlanta, March 2 - 3, Paper No. 3(1982)
- 9) M.Rehman, A Study of Multiple - Inlet Valveless Pulsed Combustor, Ph.D.Thesis, Univ.of Calgary (1976)
- 10) L.D.Winiarski, A Logically Simple Method for Solving the Gas Dynamics of a Pulsating Combustor, Proc.1st International Symp.of Pulsating Combustion, Univ. of Sheffield, England, Sept.20 - 23, Paper No. 2(1971)
- 11) J.S.Cronje, An Experimental and Theoretical Study of Pulsed Pressure-Gain Combustion, Ph. D.Thesis, Univ.of Calgary(1979)
- 12) P.Bogdan, W.Stanislaw, On Modelling of Pulse Combustors, 20th Symposium(Int) on Combustion, 2019 - 2024(1984)
- 13) 林光烈, 崔炳輪, 吳相憲, 空氣밸브型脈動燃燒器의 動的 特性에 관한 實驗적 研究, 大韓機械學會 論文集, 11(5), 846 - 855(1987)
- 14) 林光烈, 吳相憲, 崔炳輪, 空氣밸브型脈動燃燒시스템의 燃燒特性에 관한 研究, 大韓機械學會 論文集, 12(2), 328 - 337(1988)
- 15) 大島遊博, et al, バルス燃燒に關する實驗的研究, 第24回燃燒シンポジウム前刷集, 239(1986)