

〈論 文〉

헬름홀쯔형 맥동연소기의 연소 및 작동특성에 관한 실험적 연구

길상인* · 신현동**

(1991년 5월 4일 접수)

An Experimental Study on the Combustion Characteristics in the Helmholtz-Type Pulsating Combustor

S.I. Keel and H.D. Shin

Key Words: Pulsating Combustor(맥동연소기), Flapper Valve(공기흡입밸브), Residual Flame
(잔류화염), Ignition(착화), Resonant Frequency(공명주파수)

Abstract

In spite of the merits of high heat transfer, low NO_x emission and compact combustion, direct and/or indirect application of pulsating combustion system is at a low ebb due to the strong noise and the lack of physical understanding. Knowledge on the physical natures of the heat addition process coupled with the acoustic wave is a key factor in determining a way for the effective control of the pulsating combustor. The purpose of this study is physical understanding of the periodic combustion process in the Helmholtz-type pulsating combustor. To realize it, direct visualization, measurements of mean temperature and species concentration and the investigation of the fuel flowrate's effect to the fluctuating pressure, air suction rate and frequency were performed. Volumetric expansion of the flame attached at the edge of the stabilizer occurs during the main reaction period which corresponds to the pressure increasing. Ignition occurs by mixing fresh reactants with a hot residual flame which has a shape of a sooty luminous flame. Fuel consumption rate is proportional to the operating frequency linearly and square of the fluctuating pressure. In other words, the amount of consumed fuel for a cycle is independent of the operating frequency or the fuel flowrate in a given geometry. If minimum mixing and reaction times can be obtained in a period, expansion of fuel input range and high frequency's operation will be possible.

1. 서 론

맥동연소는 연소에 기인된 발열가정과 연소기내에서 거동하는 압력과 사이의 상호관계가 자발적으로 제어됨으로써 나타나는 일종의 자율연소로 정

의할 수 있으며 이 압력파는 장치의 구조상 결정되는 공명주파수의 특성을 갖고 맥동류를 형성한다. 따라서 맥동연소 현상을 유지, 제어하는 공명압력파는 인위적으로 제공할 수 있는 성질의 것이 아니라 열에너지에 의하여 자발적으로 그리고 주기적으로 생성된다. 맥동연소에 관한 연구는 1777년 Higgins가 소개한 "singing flame"에서부터 시작되어 현재에 이르기까지 2세기가 넘는 역사를 가지고

* 한국과학기술원 기계공학과

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

있다¹¹⁾. 초기에는 자유제트화염이 특정한 주파수, 즉, 장치의 고유주파수를 갖는 주위유동에 대해 공명반응을 나타내는 현상을 음향학적으로 설명하고자 하였으나 공명기의 원리가 도입되어 현재와 같은 내부연소방식으로 변환되었다.

기존의 연구를 통해서 확인된 맥동연소기의 장점으로는 전열관(배기관 또는 공명관)을 통한 열전달 효과의 상승, 공해물질인 질소산화물 배출의 감소, 반응물의 공급 또는 생성물의 배출에 별도의 에너지원 불필요 그리고 고부하연소에 의한 장치의 소평화를 들 수 있다^(2,3,4). 반면에 공명관과 밸브에서 발생하는 강한 소음 그리고 진동에 의한 재료의 파괴, 파괴 등의 문제점을 맥동연소기는 내포하고 있다. 그러나 이 보다는 비정상 연소현상의 해석이 물리적, 화학적으로 충분히 이루어지지 못하고 있기 때문에 현재에 이르기까지 맥동연소기의 이용이 활발하지 않은 것으로 보여진다.

맥동연소기의 작동에 관한 대표적 연구결과로는 Keller⁽⁵⁾와 Ponizy⁽⁶⁾의 논문이 있다. 이들은 Schlieren 가시화 및 물리량 측정실험을 통하여 맥동연소의 이해를 하고자 하였다. Keller는 연료와 공기의 공급량을 강제로 조절할 수 있는 맥동연소기를 이용한 실험에서 압력변동의 크기와 발열량은 당량비 또는 과잉공기에 의해서 보다는 반응물의 평균질량유동에 의해 크게 변화하며 연소실에는 화염이 지속적으로 존재하여 착화원으로 작용하는 것을 알았다. 그러나 Ponizy는 고온연소생성물에 의해 재착화가 일어난다고 하는 Keller의 연구결과와 다른 결론을 제시하였는데 이러한 상반된 결과는 화염의 직접관찰이 이루어지지 못하였기 때문으로 사료된다. 또한 이들은 연소시 발생하는 OH나 CH기의 광학적세기를 측정하여 이로부터 열방출량모델을 제시하였는데 이러한 정보에 의해 맥동연소 연구가 실험적, 수치적 연구가 좀더 발전할 수 있었다.

Zinn⁽¹⁾은 새로운 연소방법론을 소개하는 자신의 서적을 통해서 다음과 같은 질문을 던지고 있다.

- (1) 착화는 한주기중 언제 일어나는가?
- (2) 착화는 연소기내의 어느 곳에서 일어나는가? 또한 여러 곳에서 다발적으로 일어나는가?
- (3) 착화구조는 무엇인가?
- (4) 맥동이 혼합과정에서 어떠한 영향을 미치는가?
- (5) 언제 어디서 발열이 일어나는가?

위의 사항들은 맥동연소기 연구의 핵심으로서 연구진행 방향을 제시하고 있다.

본 연구의 목적은 자체 제작된 헬름홀쯔형 맥동연소기를 이용하여 작동원리와 연소특성을 조사함으로써 맥동연소현상을 물리적으로 이해하는 것이다. 주기적 화염의 직접가시화, 연소장의 시간평균 온도 및 농도분포, 변동압력의 크기와 공기흡입량을 조사함으로써 맥동에 영향을 미치는 요인이 무엇인지 그리고 이것이 어떠한 변화를 야기시키는가를 살펴보고자 한다. 이렇게 얻어진 결과의 종합을 통해 장치의 형상이 결정된 일반적인 맥동연소기가 자발적인 상태에서 작동될 때 작동결정인자가 무엇인가를 알수가 있을 것으로 사료된다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 맥동연소장치를 개략적으로 나타낸 그림으로 여기서 x 는 연소실 입구로부터 축방향의 거리를 그리고 r 은 연소실 중심으로부터 반경방향의 거리를 나타낸다. 장치는 크게 맥동연소기, 연료공급계 그리고 작동시에만 사용되는 공기공급계로 구성되며 맥동연소기는 연소실 직경이 공명관의 직경보다 두배 이상 크므로 음향학상으로 헬름홀쯔공명기로 분류할 수 있다. 연소실은 직경이 76mm인 실린더형이며 공기흡입관의 출구에서부터 공명관 입구 사이에 이르는 연소실 총체적은 540cc이다. 연소실 출구부에는 내경이 19mm이고 길이가 1.5m인 공명관이 부착되어 있으며 연소실과 공명관은 유동의 원활성을 고려하여

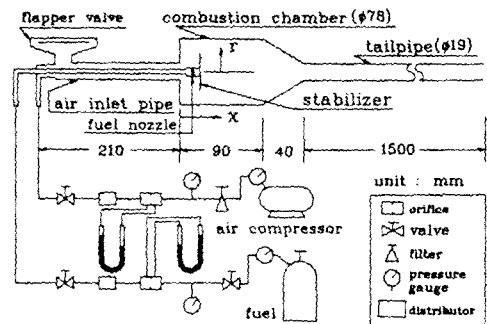


Fig. 1 Schematic diagram of pulsating combustion system

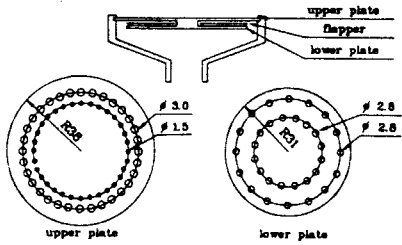


Fig. 2 Flapper valve

원형축소관으로 연결하였다. 공명관의 초입부 60 mm에 이중수냉관을 부착하였는데 이는 장치의 재질이 황동인 관계로 인하여 고온의 연소가스 접촉 부분에서 용융의 가능성이 있기 때문이다. 가시화 시에는 연소실의 벽을 동일 크기의 유리관(pyrex)으로 대체된다. 연소실상부에 연결된 공기흡입관의 내경은 20mm, 길이는 210mm이며 고온의 화염으로부터 열에 약한 플래퍼(사용범위 250°C)를 보호하는 역할을 하고 있다. 공기흡입관의 중앙으로는 저장용기로부터 연소실내에 위치하는 분사노즐까지 연료를 전해주는 직경 5mm의 연료유도관이 지나간다.

Fig. 2에는 플래퍼밸브의 형상이 자세히 나와 있다. 밸브의 윗판(대기접촉부)에는 2개의 큰 원형을 이루는 구멍들이 있는데 바깥쪽에는 직경이 3mm인 구멍 32개가 그리고 안쪽에는 직경이 1.5mm인 구멍들이 균일하게 분포되어 있다. 또한 아랫판에는 연소기내의 압력을 전달하기 위하여 윗판과 마찬가지로 2개의 원형으로 직경이 2.8mm인 구멍들이 분포되어 있다. 두판사이의 간격은 공기량의 결정에 매우 중요한 실험요소가 되므로 임의로 조절 가능하도록 제작하였다. 기초실험 결과, 이 간격이 $[1\text{mm} \pm 0.2\text{mm}]$ 의 좁은 영역에서만 맥동연소기가 정상적으로 작동되었으며 본 실험에서는 이 간격을 1mm로 고정하였다. 이처럼 밸브가 움직일 수 있는 간격이 좁은 이유는 맥동연소기가 수십 또는 수백 Hz의 빠른 압력변동특성을 갖고 있기 때문이다. 플래퍼는 압력에 대한 빠른 응답과 공기유동 제어의 정확성을 위해 가볍고 밀착성이 좋아야 하는데 이를 위해 스테인레스스틸, 알루미늄판 등 다양한 재료를 사용하여 보았으나 테프론이 입혀진 석면천이 가장 적합한 것으로 밝혀졌다. 연료분사노즐은 $x=13\text{mm}$ 단면의 중앙에 위치하며 반경 방향을 향하는 직경 1mm의 구멍 12개로 이루어져

있는데 이는 화염의 구조나 유동이 유사 2차원적 특성을 갖도록 함으로써 실험결과에 대한 현상해석을 용이하게 하고 나아가서 수치계산을 위한 좀더 발전된 발열모델 제시가 가능하게 하기 위한 것이다. 연료분사노즐 위에는($x=20\text{mm}$) 직경을 변수로 하는 두께 1mm의 안정판(stabilizer)이 놓여 있다. 이러한 연소실 구조는 공기흡입관을 통해 유입되는 공기와 노즐에서 분사되는 연료가 $x=0\text{mm}$ 부터 $x=20\text{mm}$ 사이의 좁은 영역 그리고 안정판 후류에 형성될 것으로 기대되는 재순환영역에서 빨리 혼합시키고자 하였기 때문이다. 실제 맥동연소기의 설계에 있어서 가장 큰 어려움은 연소실의 형상과 반응물의 유입방법이다. 이는 압력과 발열과의 위상관계가 맥동연소기의 작동에 매우 중요하며 이들 사이의 관계는 착화 및 연소시간과 깊은 연관이 있기 때문이다. 이것 때문에 맥동연소기의 형상은 더욱 복잡하게 되고 이로인해 현상의 해석도 점점 어려워지게 되는 경향이 있다.

Fig. 1에 나타난 바와같이 연료통에서 나와 오리피스에 의해 유량을 조사한 후 연소실로 유입된다. 이때 연소기내의 압력변동에 의한 유량의 변동특성을 줄이기 위해서 오리피스의 후류에 일시저장용기를 설치하였다. 맥동연소기가 정상작동할 때는 플래퍼밸브에서 대기중의 공기를 흡입하지만 정지상태에서부터 맥동이 발생될 때까지는 공기의 강제공급에 의한 맥동화염의 형성이 요구된다. 본 연구에서는 공기흡입관 최상류의 연료유도관 주위에 밸브를 설치하고 이것을 공기압축기와 연결하여 일시적으로(약30초정도) 공기를 공급시킨다. 이후 맥동이 일어나서 플래퍼가 움직여 자발적으로 공기를 흡입할 때에 강제공급되는 공기는 차단되며 연소기가 충분히 가열되고 나서(약 5~10분 소요) 각종 측정이 수행된다.

2.2 실험방법

현재까지 레이저를 이용한 계측기술의 발달로 인하여 시,공간분해능이 높은 연소장의 설명이 가능해지고 있다. 그러나 방법론의 한계와 경제성 문제로 인하여 본 연구에서는 재래에 많이 쓰고 있는 계측방법의 복합적용을 많이 적용하고 있다.

(1) 압력측정

변동압력의 측정은 작동구조 및 연소가스의 유동을 예측할 수 있는 가장 기본적인 실험이며 이것을 동조신호로 이용하면 측정된 물리량이 시간에 따라

어떻게 변하는지를 알 수 있다. 압력의 측정에는 시간응답성이 우수한(response time=1 μ sec) 압전형 압력변환기를 사용하였다.

(2) 흡입공기량 측정 및 플래퍼밸브 거동 조사

공기 유동정보를 구하기 위해서는 공기흡입관 출구(x=0mm)에서 연소실도 유입되는 공기의 속도를 측정하는 것이 바람직하지만 장치의 구조상 이 속도를 측정하지 못하였으며 대신 플래퍼밸브로 유입되는 공기의 시간평균유량을 조사하였다. 정상상태로 공기가 흐르는 조건에서의 검증을 통해 유량과 압력강하 사이의 관계를 이미 아는 직경 18mm의 오리피스를 사용하여 플래퍼밸브로 들어가는 공기량을 측정하며 이때 유동변동이 측정치에 주는 영향을 줄이기 위하여 오리피스와 밸브 사이에 한쪽 벽이 고무판으로 된 체적 70리터의 서지탱크(surge tank)를 장착하였다. 그러나 공기량 측정을 위하여 부착된 장치들을 통하여 대기중의 공기가 연소기로 유입될 때에 압력손실이 있을 것으로 생각되며 플래퍼밸브만 있을 경우에 비하여 공기유입량이 약간 감소하리라 사료된다. 또한 밸브의 거동은 Fig. 2에서 보이는 상판과 하판 사이에서 움직이는 플래퍼의 대기접촉면에 전기전도체인 은박을 입히고 밸브 상판의 구멍에 전압단자와 접지단자를 연결하여 조사하였다.

(3) 가시화

맥동연소기에서와 같이 주기적 변동을 하는 화염을 직접가시화하는 데에는 몇가지의 문제점들이 있다. 그 중의 한가지는 연소장에서 방출되는 빛이 약하다는 것이다. 연소현상을 가시화하는 경우 일반적으로 고속촬영기를 많이 사용하지만 고속카메라에서의 노출은 촬영매수의 3분의 1 정도에 불과하므로 광원에 의해 사용이 제한을 받는다. 따라서 높은 촬영매수에서 양질의 사진을 얻기 위해서는 연속적이고 강한 광원이 필요하다. 맥동화염에서 나오는 화염의 광도는 매우 약하기 때문에 원하는 촬영속도와 감광에 필요한 광도사이에서 적정점을 찾기가 어려우며 외부에서 광원이 공급될 때, 주위 배경과의 대비차가 크지않기 때문에 맥동현상이 불분명해지는 것을 본 실험의 가시화에 고속촬영기를 사용해본 결과 알 수 있었다. 가시화 어려움의 다른 한가지는 화염의 시간추이를 알기 위해서는 사진이 찍힌 시간 혹은 유동장내의 조건을 확인할 필요성이 있다는 것이다.

위에서 언급된 문제점을 해결하기 위해서 가시화

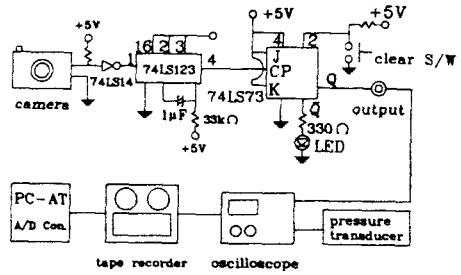


Fig. 3 Electric circuit for detecting the time of taking pictures

에 수동형카메라를 사용하는 Fig. 3과 같은 간단한 전기적 감지회로를 구성하였다. 가시화는 1/2000초의 셔터속도 조건에서 수행되며 카메라의 플래쉬단자에서 송출되는 단락신호를 위의 감지회로에서 사진분석용 ON/OFF 신호로 바꾼다. 이 신호는 압력신호와 더불어 테이프레코더에 연속적으로 저장되며 이 결과를 A/D변환기를 이용하여 사진이 주기적인 압력변동의 어느 위상에서 촬영되었는가를 분석한다.

(4) 시간평균 온도 및 농도 측정

연소실에서 추출된 가스에는 반응물과 생성물 그리고 중간생성물 등의 여러가지가 섞여 있다. 각성분들이 하나의 고체분리관을 통과하며 분리되는 것은 어려우므로 분석은 미연탄화수소와 기타성분의 검출로 나누어 수행되었다. 탄화수소의 분석시에는 불꽃이온화검출(FID: flame ionization detector) 방법이 그리고 기타성분의 분석에는 열전도도검출기(TCD: thermal conducting detector)에 의해 농도분석이 이루어지며 농도의 측정은 연소실 내의 6단면 24지점에서 수행되었다.

시간평균 온도는 0.1mm R-type 열전대로 측정하였다. 열전대로부터 나온 기전력은 디지털 온도계와 동시에 A/D변환기로 받아서 평균전압을 구하고 이것을 온도로 환산한다. 측정은 연소실 내의 13단면의 208지점에서 이루어졌다.

3. 결과 및 고찰

3.1 맥동화염의 가시화

Fig. 4는 연료공급량이 5.5 l/min의 상태에서 직접가시화된 사진을 이미지 처리한 것인데 이러한 과정을 거친 이유는 배경과 화염의 대비를 명확히 하기 위해서이다. 여기서 무차원 시간 $Tn=0$ 는 연

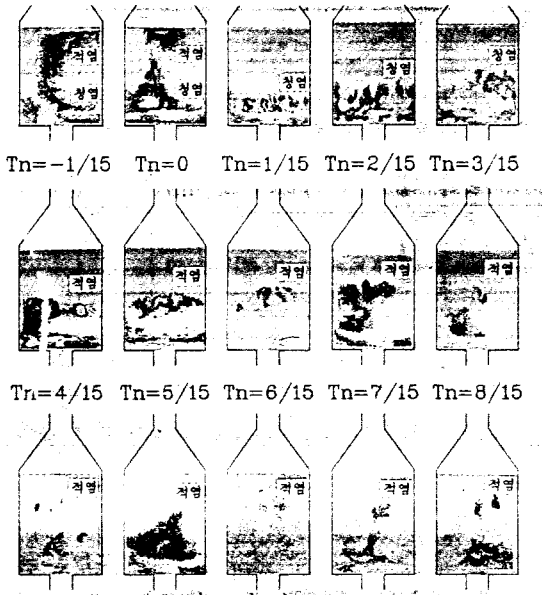


Fig. 4 Image processing result of phase locked direct photographs $T_n=0$: upward zero crossing pressure

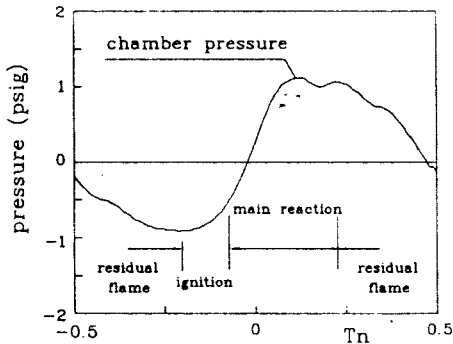


Fig. 5 Pressure conditions of the three periods in the pulsating flame

소실의 압력이 상승중에 있을 때의 대기압 조건을 나타낸다. 가시화 결과는 화염의 형상과 색에 따라 한 주기를 주반응기, 잔류화염기 그리고 착화기로 분류하였으며 Fig. 5에는 이러한 구간분류 조건의 이해를 돕기 위해 연소실의 압력을 나타내고 있다.

(1) 주반응기(main reaction period: $T_n = -1/15 \sim 3/15$)

이 시기는 연소실에서 청염이 형성되는 때를 의미하며 압력이 대기압에 이르기 약 1/15주기 전부

터 시작하여 최고압에 도달될 때까지 한주기의 1/3에 해당된다. 주반응기의 초기($T_n = -1/15$ or 0)에는 연소실 하류의 중심영역에서 이전의 주기부터 남아있던 불완전연소장이 관찰되지만 시간이 지남에 따라 안정관 후류의 재순환경계역을 타고 빠른 속도로 하류까지 퍼져나가는 청염이 관찰된다. 본 연구에 사용된 맥동연소장치는 연료와 공기가 각기 분리되어 연소실로 유입되기 때문에 일반적으로 확산형(diffusion type) 맥동연소기로 분류하지만 연소실에서 형성된 화염이 확산화염이라는 것을 의미하지는 않는다. 가시화된 화염에서도 맥동화염이 확산화염이나 예혼합화염 중의 어느 한가지로 결론 내릴 결정적 근거는 관찰되지 않는다.

(2) 잔류화염기: residual flame period: $T_n = 4/15 \sim 11/15$,

이 시기는 연소실 압력이 최대치에서부터 다음 주기의 착화현상이 나타나기 전까지 8/15주기동안 지속된다. 잔류화염기의 연소장에는 공기의 부족으로 인해서 넓은 영역에 걸쳐서 휘염이 형성된다. 후의 플래퍼밸브 거동조사 결과에서 다시 언급되었지만 공기의 재유입은 연소기 압력이 대기압이하로 떨어지는 순간($T_n = 8/15$)에 이루어진다. 그러나 연소실에서 새로운 화염대가 형성되기까지는 약 4/15주기(3.7msec)의 착화 지연이 있다. 잔류화염기에서 중요한 것은 화염이 공명관을 통하여 배출되거나 연소실에서 소화되어 버리는 것이 아니라 불완전연소장의 형태로 남아있다가 다음주기로 이어진다는 것이다.

(3) 착화기(ignition period: $T_n = 12 \sim 13/15$)

공기가 유입되기 시작하고난 후, 약 4/15주기가 경과한 $T_n = 12/15$ 때에 연소실의 안정관에 후류에서 반응이 동반된 재순환유동을 관찰할 수 있으며 연소실 압력도 비로소 상승하기 시작한다. 이러한 가시화 결과를 이용하면 서론에서 소개한바 있는 착화에 대한 Zinn의 의문점에 대한 답을 얻을 수 있다. 착화는 연소실 최소압의 상태에서 혼합기와 잔류화염이 안정관 후류의 재순환영역에서 섞이면서 일어난다. 앞절에서 언급한 4/15주기의 착화 지연, 즉, 대기압에서부터 최소압력까지 떨어지는데 걸리는 시간은 결과적으로 맥동연소장 형성에 필요한 혼합특성시간으로 생각할 수 있다. 연료분사 노즐의 복잡한 형상과 위의 착화 지연시간($T_n = 8/15 \sim 12/15$)을 고려할 때, 어느 정도의 예혼합특성이 맥동화염에 내포되어 있음을 예측할 수 있지만

3.7msec 정도의 짧은 혼합시간과 적염의 존재는 1 주기 동안의 맥동화염은 확산화염의 성질도 갖고 있을 것으로 사료된다.

3.2 압력변동 및 플래퍼밸브의 거동

Fig. 6은 연료유량이 5.5 l/min일 때에 $x=-165$ mm(P1, 공기흡입관) 그리고 $x=33$ mm(P2)와 83 mm(P3, 연소실)의 세 단면에서 동시에 측정된 압력신호를 도시한 것이며 주파수분석 결과는 Fig. 7에 있다. 각 압력신호는 72.5Hz의 공명주파수와 조화주파수(145Hz, 217.5Hz) 등의 합으로 이루어져 있으나 배음의 성분이 압력형성에 끼치는 효과가 그리 크지 않다는 것을 주파수분석으로부터 확인할 수 있다. Fig. 6의 연소실에서 측정된 압력신호 P2와 P3는 정압의 영역에 두개의 극대치를 형성한다. (A) 앞의 극대값은 주반응기의 압력상승에 의한 것이며 두번째 것은 공기의 2차 유입에 의한 것으로 공기흡입관의 압력이 연소실의 압력보다 높아지기 때문에 나타난다. 연소실 내의 압력(P2, P3)은 공기흡입관에서의 압력(P1)보다 약 1/30주기 정도 위상이 선행되는데(B), 여기서의 시간차 0.46msec는 공기흡입관 내의 측정지점($x=-165$ mm)이 연소실로부터 떨어진 거리와 압력파의 전파속도의 비와 일치하며 이러한 현상은 Keller의 문헌⁽⁵⁾에서도 관찰할 수 있다. 또한 공명관을 통하여 배출되는 연소가스의 배기관성 효과로 인하여 연소실 상류(P2)보다는 하류(P3)에서 다소 큰 부압이 나타난다. (C)

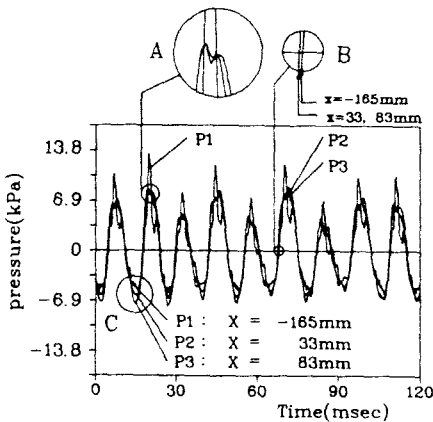


Fig. 6 Instantaneous pressure signals measured at the multipoints with fuel flowrate of 5.5 l/min

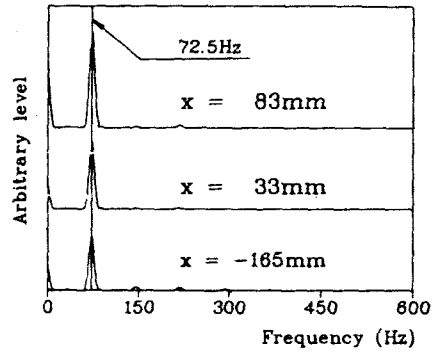


Fig. 7 Frequency analysis of pressure signals

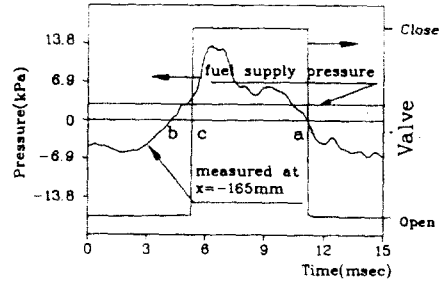


Fig. 8 Flapper valve motion

Fig. 8은 공기흡입관($x=-165$ mm)에서 측정된 압력과 동조시켜 플래퍼 밸브의 움직임을 조사한 결과로 연료유도관에서 측정된 연료의 공급압력도 표시되어 있다. 공기흡입밸브는 연소기 압력이 대기압 이하로 떨어지는 순간 열리며 부압시간대를 포함하여 0.6주기(8.29msec) 동안 공기유입이 지속된다. 연료공급 압력을 연소기 압력과 비교할 때, 연료의 흡입시간은 공기의 유입시간을 포함하며 이 보다는 1/20주기정도 길다. 연료압이 연소기의 평균압에 비해 별로 크지 않다라는 것은 연료의 유입 연소실의 압력변동에 의해 자동으로 제어됨을 말해준다.

자발맥동연소 연구에서 장치의 형상이 결정된 경우 연구자가 임의로 택할 수 있는 실험인자는 연료량 뿐이다. 본 실험에서 사용된 맥동연소기의 거시적 작동특성을 연료공급량 조절을 통해 조사한 결과가 Fig. 9에 있다. 원활한 작동이 가능한 연료량 범위는 [2.8~7.2 l/min]이며 이 구간내에서 공급 연료량이 증가할수록 맥동압력의 크기와 흡입공기량은 증가한다. 연료량이 4.5 l/min보다 작을 때

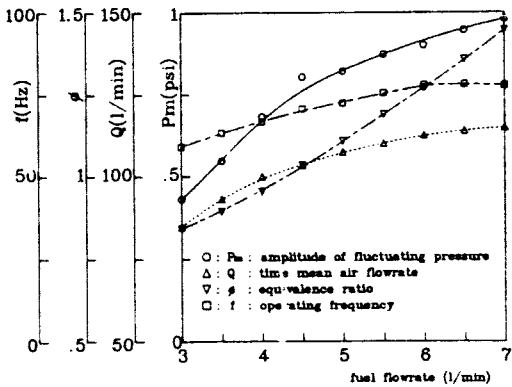


Fig. 9 Response of pulsating combustor with the variation of fuel input

는 흡입공기량이 필요공기량보다 많이 연소기로 유입되지만(당량비 <1) 그 이상의 유량조건에서는 산화부족으로 인하여 연료과잉의 연소장이(당량비 >1)이 나타난다. 특히 작동유량한계에 근접할수록 연료와 공기의 유입상태는 가연한계에 근접된다. 즉, 연료공급량 3 l/min에서는 시간평균적으로 당량비 0.7의 맥동연소가 또한 7.0 l/min에서는 당량비 1.5의 연소장이 형성된다. 이러한 결과제시는 맥동연소기의 거동을 대략적으로 살펴보기 위한 것이며 세부적인 사항은 위의 결과와 기타 실험결과의 연관성조사를 통해 다루고자 한다.

3.3 연소실에서의 시간평균 온도 및 농도

Fig. 10는 $x=25\text{mm}$ 에서부터 $x=85\text{mm}$ 단면사이의 연소장 208지점에서 측정된 시간평균 온도분포를 보여주고 있다. 압력과 마찬가지로 온도변동에 관한 정보가 있으면 맥동연소현상 이해에 매우 유익하겠지만 속도변동성분이 시간평균치에 비해 그리 작지 않은 비정상 유동 조건하에서의 시상수결정과 이에 의한 보상은 물리적으로 의미가 없는 작업이다. 등온선도의 전체적인 분포를 보면 좌우대칭의 형태를 나타내는데 이것은 현상의 단순화를 위해 채택된 반경방향 연료분사에 의한 결과이다. 안정판 후류의 재순환 영역(center of $x=35\text{mm}$)에는 주위에서 연소된 고온가스의 유입으로 인하여 1300°C 이상의 고온 영역이 형성되며 연소실 하류로 갈에 따라 그리고 벽쪽으로 퍼져 갈에 따라 시간평균 온도는 급격히 감소하여 $1000^{\circ}\text{C}\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 에 이른다. 이로부터 맥동화염의 온도는 일반적인 정

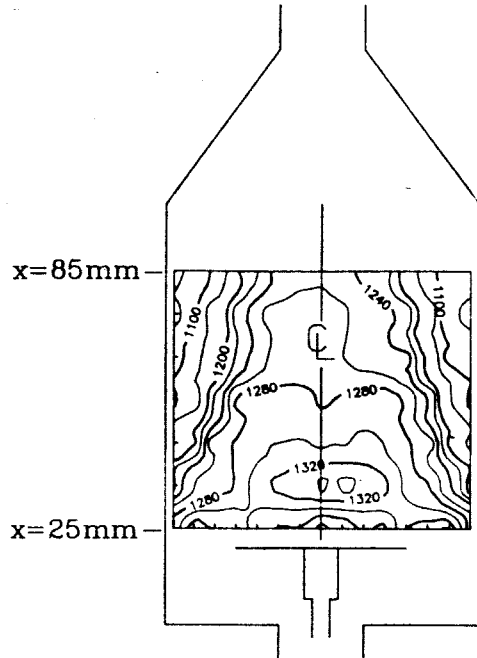


Fig. 10 Temperature distribution(fuel flowrate = 5.5 l/min)

상연소 버너에서의 화염온도($1700^{\circ}\text{C}\sim 2000^{\circ}\text{C}$)에 비해 현격히 낮음을 알 수가 있다. 이는 연소실에서 청염의 고온 반응대가 지속적으로 존재하는 것이 아니라 착화원만 남아있는 상태에서 찬 반응물이 주기적으로 유입되어 평균온도를 낮추게 되기 때문이다.

실험에 사용된 연료를 분석한 결과 프로판(C_3H_8)이 97.4%, 에탄(C_2H_6)이 2.36% 그리고 메탄(CH_4)이 0.5%가 나왔다. 이러한 연료의 공급유량이 5.5 l/min일 때에 연소장의 시간평균 농도분포 측정결과(dry basis)가 Fig. 11에 있다. 산소와 탄화수소의 농도는 벽으로 갈수록 증가하는 반면 이산화탄소의 농도는 감소하는데 이것은 연소실벽을 통한 전열손실이 커서 나타나는 결과로 사료된다. 또한 가시화에서 확인된 것과같이 화염대가 주로 형성, 존재하는 연소실의 상류에서는 중간생성물인 일산화탄소와 수소가 많이 검출된다. 일산화탄소의 과다검출은 비정상 고속 혼합에 의한 반응시간의 부족, 산소의 불균일 그리고 벽면냉각에 의한 것으로 사료된다.

공명주파수의 예측방법에는 공명관내의 유체를 하나의 질량체를 보고 설정한 2계미분방정식에 의

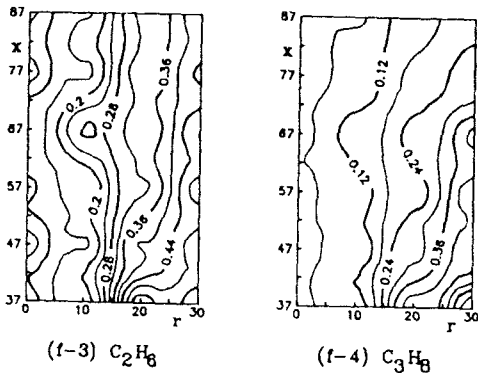
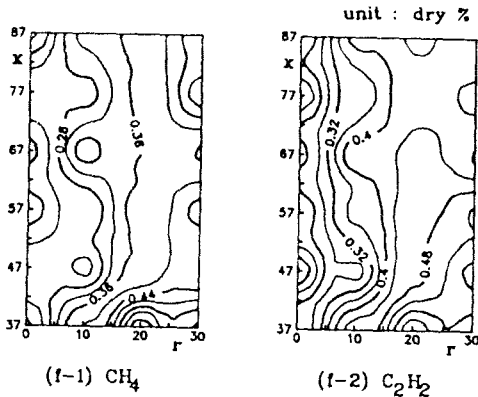
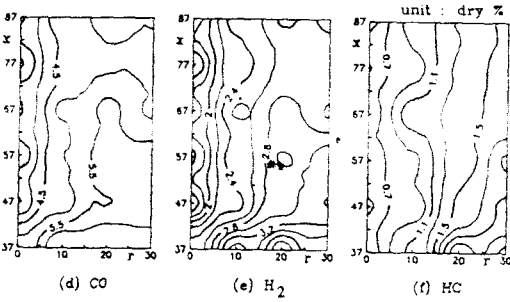
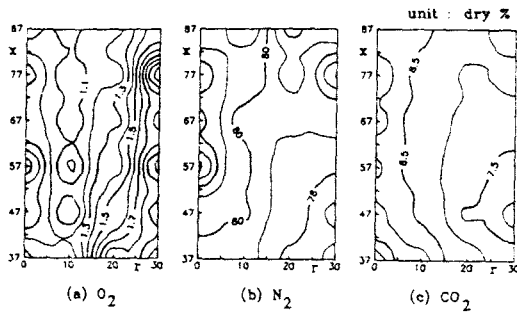


Fig. 11 Distribution of time mean species concentration

해 공명주파수를 결정하는 헬름홀쯔 공명주파수 결정법⁽⁷⁾과 Sine형태 압력변동을 갖는 연소실과 대기압 상태인 공명관 출구 사이에서의 유동을 해석적으로 풀 1차원 압축성 유동해석방법⁽⁸⁾이 있다.

헬름홀쯔 공명주파수 :

$$f = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{LV}} \quad (1)$$

1차원 압축성 유동 해석에 의한 주파수 :

$$(2\pi fL/c) \cdot \tan(2\pi fL/c) = \frac{SL}{V} \quad (2)$$

여기서 L 과 S 는 공명관의 길이와 단면적, V 는 연소실 체적 그리고 c 는 공명관에서의 평균음속을 나타내며 실제음속은 이상기체 가정에 의해 $\sqrt{\gamma RT}$ 로 표시한다. 위의 식들은 연소실의 형상이 결정되면 작동주파수는 배기가스 온도의 제곱근에 비례하는 음속에 의해서 정해지며 반응물의 유량에는 무관한 것처럼 보인다. 그러나 맥동연소기를 작동시켜보면 연료유량이나 공기공급량의 조그마한 변화에도 작동주파수가 예민하게 변하는 것을 쉽게 관찰할 수가 있다. 과연 이것이 온도의 변화에 기인하는 것인가를 확인하기 위해 작동주파수를 조사하였다. 또한 (1)식과 (2)식의 주파수 계산에 필요한 온도를 위해 공명관 입구인 $x=90\text{mm}$ 단면의 중심에서 온도를 측정하였다. 이것은 공명관 초입부에 설치된 냉각관으로 인하여 공명관 내의 평균온도를 측정하는 것이 불가능하였기 때문이며 측정온도는 연료공급량의 변화에 대해 공명관내 공간평균 온도와 거의 유사한 변화특성을 가질 것으로 생각된다.

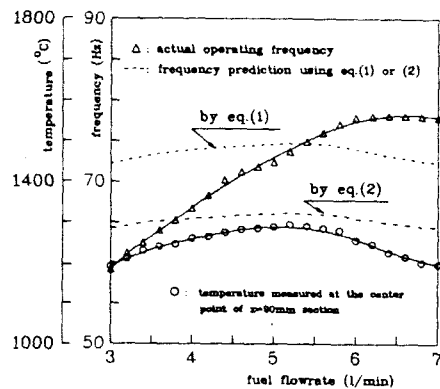


Fig. 12 The comparison of the actual frequency with the prediction

Fig. 12에서와 같이 측정주파수와 온도를 이용해 구한 주파수(그림의 점선)는 현격한 차이가 있다. 계산에 의한 주파수는 온도의 변화와 거의 유사한 포물선 분포를 보이는 반면(적용식에 따라 절대치의 차이가 있음) 실제의 작동주파수는 연료의 증가에 따라 주파수도 계속적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 결과는 작동주파수가 온도만의 함수라는 기존의 식(1)이나 (2)에 의한 표현이 적절치 못하기 때문이며 온도 이외에도 유량과 밀접한 연관이 있기 때문으로 사료된다. 작동주파수에 관한 좀더 상세한 설명은 뒤에서 다시 언급하기로 한다. Fig. 12에서 공급연료량이 5.0 l/min일 때, 온도가 가장 높은 이유는 앞의 Fig. 9에서 나타낸 바와같이 연료와 공기의 공급조건이 이론당량비 상태에 근접하기 때문이다.

압력과 결정인자를 확실히 하기 위해 변동압력의 진폭과 연소된 연료량과의 상관관계를 Fig. 13에 도시하였다. 연소연료량은 Fig. 8에서 공기의 부족에 따른 연료잔류분을 제외한 양을 나타낸다. 실험 결과 변동압력의 크기 P_m 은 실제로 연소된 연료량의 제곱에 비례하는 것으로 밝혀졌다.

$$P_m = K_1 \cdot \dot{m}_f^2 \quad (3)$$

K_1 은 비례계수로서 \dot{m}_f 의 단위가 [l/min]이고 P_m 의 단위가 [Pa]일 때 실험으로부터 이 값은 $286.6 [Pa/(l/min)^2]$ 였다. 연소기로 유입되는 공기의 양은 변동압력의 부압에 의해서 결정되며 정압에서는 공기의 흡입은 이루어지지 않는다. 만약 압

력을

$$p(t) = P_m \cdot \sin(\omega t)$$

와 같이 나타낸다면 단위시간당 흡입공기량 \dot{Q}_{air} 은 유속이 압력차의 제곱근에 비례한다고 보아

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{air} &= K_2 \cdot f \cdot \int_0^{\frac{1}{2T}} [P_m \cdot \sin(\omega t)]^{\frac{1}{2}} \cdot dt \\ &= K_3 P_m^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

가 되며 실험결과식인 (3)식을 (4)식에 대입하면 흡입공기량은 다음의 식으로 나타내어진다.

$$\dot{Q}_{air} = K_4 \cdot \dot{m}_f / \rho \quad (5)$$

위 식에서 K_4 는 흡입공기의 완전연소를 위한 이론공연비를 나타내며 이 결과는 연소연료량이 공기 흡입량과 선형적 비례관계를 갖는다는 당연한 결과를 보여준다. 따라서 변동압력의 크기 P_m 이 공급기준이 아닌 실제 연소된 연료량의 제곱에 비례하는 실험식(3)의 표현은 충분히 타당하다.

Fig. 14는 연료량을 변화시키면서 압력 및 흡입되는 공기량을 측정하여 부족공기에 의한 연소불가 연료량을 제외한 연소연료량과 작동주파수와와의 관계를 조사한 것이다. 이 결과를 보면 60Hz 이하의 저주파 작동영역을 제외하고 한주기동안 소모된 연료의 양과 공기량은 작동주파수에 상관없이 일정하다. 맥동연소기의 설계에서 작동주파수는 크게 변화하는 인자가 아닌것으로 알려져 있다. 그러나 위그림의 작동주파수와 유량과의 관계를 볼 때,

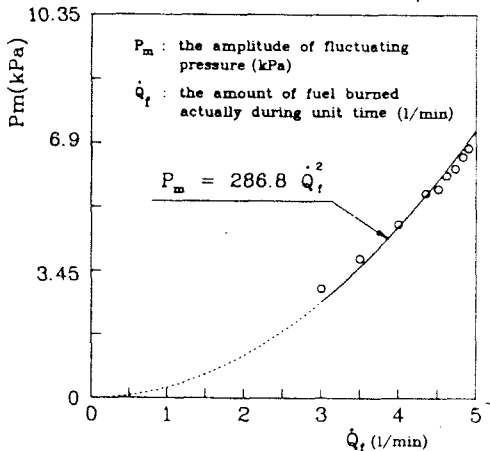


Fig. 13 The amplitude of fluctuating pressure with the variation of fuel consumed actually

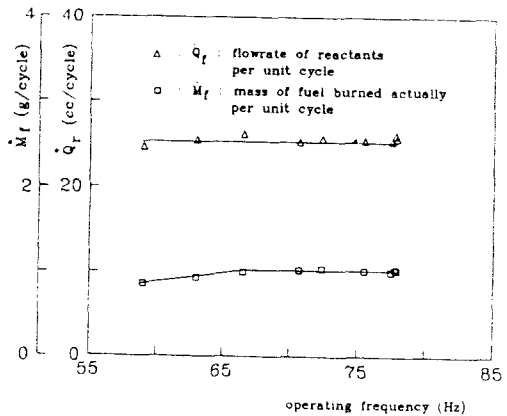


Fig. 14 Operating characteristics as functions of operating frequency

맥동연소기의 형상이 결정되면 자동으로 결정되는 인자는 연소기의 형상에 적합한 단위 주기당의 연료 또는 공기량이라는 것을 보여준다. 즉, 주어진 장치에서 연소실에 형성되는 반응대는 연소기 형상에 따른 일정한 체적효율을 갖고 있으며 이것은 유량에 의해 크게 달라지는 것이 아니다. 부연하면, 단위시간당 공급 연료량이 증가하면 압력의 증폭은 커지는 반면 주기가 짧아져 실제 연소실에서 단위 주기당 반응물 소모 유량은 일정하게 유지된다. 따라서 맥동연소기의 작동주파수는 연료와 공기의 혼합 그리고 발열에 필요한 최소한의 시간이 확보될 수 있는 유한의 주파수 영역까지 확장될 수 있는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 실험에서는 자발적으로 공기의 공급이 제어되는 헬름홀츠형 맥동연소기를 자체제작하여 맥동화염의 거동 및 연소기의 작동구조에 관한 연구를 수행하였다. 이에 얻어진 결론은 다음과 같다.

맥동연소기 내에서는 지속적으로 화염이 존재하고 있으며 주반응기의 압력상승은 청염의 반응대 형성시간동안 이루어진다. 또한 착화는 최저압력시에 적염상태의 잔류화염에 의해서 이루어지며 착화 위치는 새로이 유입된 반응물과 잔류화염의 혼합이 이루어지는 안정관의 후류영역이다. 작동주파수는 연소연료량 또는 흡입공기량과 선형적인 비례관계를 갖고 있으며 한주기 동안 소모된 반응물의 유량은 일정하다. 연료량의 증가는 변동압력 크기의 증가를 통해 흡입공기량의 증가로 이어진다. 따라서 연소실의 형상 및 크기에 따라 일정한 체적효율을 갖게되는 연소장의 생성 및 소멸시간, 즉, 한 주기는 짧아지며 작동주파수는 증가하게 된다. 이것은 맥동연소기의 형상이 결정될 때, 한주기동안 연소시킬 수 있는 연료량이 정해져 버리는 것을 의미하며 혼합과 연소에 필요한 최소한의 시간이 확보되는 작동주파수의 영역까지 맥동연소기의 작동이 가

능하다. 이를 위해서는 맥동연소기의 설계시에 반응물의 혼합 및 공기의 충분한 흡입이 매우 중요시 되어야 한다.

참 고 문 헌

- (1) Zinn, B.T., 1986, "Advanced Combustion Methods," Ch.2, Academic Press.
- (2) Hanby, V.I., 1969, "Convective Heat Transfer in a Gas-Fired Pulsating Combustor," J. of Engineering for Power, pp. 48~52.
- (3) Vogt, S.T., Yen, M.S., Schoenhals, R.J. and Werner Soedel, 1989, "Performance of a Pulse Combustion Gas-Fired Water Heater," ASHRAE Transaction, Vol.86, part 1, pp. 126~141.
- (4) Corliss, J.M., Putnam, A.A. and Locklin, D.W., 1982, "Gas-Fired Aerovalved Pulse-Combustion System for Steam Raising," Proc. of Symposium on Pulsating Combustion Application, Atlanta.
- (5) Keller, J.O. and Saito, K., 1987, "Measurements of the Combusting Flow in a Pulse Combustor," Combust. Sci. and Tech., Vol.53, pp. 137~163.
- (6) Bogdan Ponizy and Stanislaw Wojcicki, 1984, "On Modeling of Pulse Combustor," Twentieth International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, pp. 2019~2024.
- (7) Lawrence, E.Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens and James V. Sanders, 1982, "Fundamentals of Acoustics(3rd ed.)," John Wiley and Sons.
- (8) Frederic W. Ahrens, Kim Choog and Shiu-Wing Tam, 1978, "An Analysis of the Pulse Combustion Burner," ASHRAE Transaction, Vol.84, pp. 488~507.