

〈論 文〉

Rijke형 연소기에서 석탄의 맥동연소에 관한 연구

권 영 필* · 이 동 훈**

(1989년 1월 26일 접수)

A Study on the Pulsating Combustion of Coal in a Rijke Type Combustor

Young-Pil Kwon and Dong-Hoon Lee

Key Words : Pulsating Combustion(맥동연소), Coal(석탄), Rijke Oscillation(Rijke 진동), Combustion Rate(연소율), Honeycomb(하니콤)

Abstract

The objective of this study is to investigate on the pulsating combustion of a granular coal in a Rijke type pulse combustor. The combustor is made of a 120cm long pipe with a honeycomb as a fire grate in the lower half. A fixed amount of coal is laid on the honeycomb and burned downward after ignition by using propane gas. Then the combustion driven acoustic oscillation occurs and makes the combustion pulsate with a very high amplitude. The effect of the pulsation and the air flow rate on the combustion characteristics is examined in comparison with the normal combustion. The non-pulsating combustion is made possible by placing absorbing material under the honeycomb. The combustion phenomena are observed visually, the burning time is measured in order to evaluate the combustion rate, and the variation of the gas temperatures is recorded. It is found that the fuel particle is greatly agitated like boiling by the flow pulsation and the burning-down velocity is so fast that the fuel is burned almost simultaneously. The combustion rate can be increased as twice as that of non-pulsating combustion with increase of the air flow rate. And the combustion becomes clean with less soot deposit and emission.

기 호 설 명

- A : 변위진폭
- B : 연소율
- C : 음속 (velocity of sound)
- D : 관의 직경
- f : 진동수
- L : 관의 길이
- Lh : 열원의 위치
- m : 공기비 또는 정수
- n : 모우드의 차수
- p : 음압(sound pressure)의 진폭

- T_1, T_2 : 온도
- U : 음(sound)의 입자속도진폭
- U_0 : 평균유속
- ρ : 기체의 평균밀도
- λ : 파장
- ω : 각 진동수
- ϕ : 위상지연

1. 서 론

맥동연소의 장점은 일반연소와 비교할 때 연소율과 연소효율이 향상되며, NOx의 배출이 적고 송풍기 없이 흡배기가 이루어지며 밸브 이외에는 (밸

*정회원, 숭실대학교 공과대학 기계공학과

**숭실대학교 대학원

브가 없는 형태 있지만) 별다른 구동부분이 없다는 점이다. 또한, 맥동(혹은 진동)유동에 의하여 열전달률이 증가되기 때문에 맥동연소기는 콤팩트하면서도 고부하연소가 가능한 에너지 절약형 연소장치인 것이다. 단점으로서의 맥동에 의한 진동소음의 발생과 운전조건에 따라서 작동특성이 변하기 때문에 안정적인 운전이 어려운 점을 들 수 있다⁽¹⁾.

전형적인 맥동연소기(pulse combustor)는 폭발형으로서 작동원리를 요약하면, 연소실 내의 압력이 부압일 때 흡입밸브가 자동으로 열려 연료와 공기가 유입되고 압력이 상승하면서 밸브가 닫힌다. 유입된 연료공기는 잔류열에 의하여 가열되어 자연 폭발하며, 폭발압력에 의하여 연소가스가 미관(tail pipe)을 통하여 배출되면서 압력이 감소하여 다시 부압이 되면 새로운 사이클이 반복된다. 이러한 맥동연소기는 처음에 자동흡배기 기능을 활용하여 로켓트의 추진용으로 사용되었으며 최근에는 캐나다, 미국, 일본 등 여러 나라에서 보일러나 각종 가열장치로서 개발 활용되고 있다⁽²⁾.

그러나, 이러한 폭발연소형에서는 유입된 연료가 한 주기 내에 연소가 끝나야 하므로 사용연료는 연소시간이 짧은 기체연료로 제한된다. 미분탄연료를 위한 맥동연소기도 연구된 바 있으나 연소지연시간과 연소시간이 길기 때문에 제한된 조건에서만 운전이 가능한 것으로 보고되었다^(3,4). 그러므로, 폭발형 맥동연소기로는 지름이 큰 입자상의 고체연료를 연소시킬 수 없다. 고체연료의 효율적인 연소는 이미 우수한 연소성능을 유지하고 있는 기체나 액체의 경우에 비하여 보다 많은 연구가 필요하며, 앞으로의 에너지 문제에 대비해서 활성화되어야 할 연구분야로 생각된다.

따라서, 덩어리 상태의 고체연료를 맥동연소시키기 위해서는 종래의 폭발연소식이 아닌 새로운 방법이 필요하며, 이것이 바로 본 연구의 대상인 Rijke형 맥동연소기로서 개략도는 Fig. 1에 도시한 바와 같다. Rijke 진동이란 양쪽이 개방된 상층기류가 있는 관의 하반부에 가열된 스크린을 놓을 때 발생하는 열음향적인(thermoacoustic) 기주진동 현상으로서 스크린 대신에 연소대를 설치하고 연소를 시켜도 비슷한 현상이 발생하므로 맥동연소기로 응용될 수 있음이 알려졌다⁽⁵⁻⁷⁾. Rijke형 맥동연소기는 종래의 폭발형과는 달리 연료나 공기의 공급 및 연소가 불연속적이거나 폭발적이지 않고 연속적인 양에다가 주기적인 양이 중첩된 형태다. 공기가나

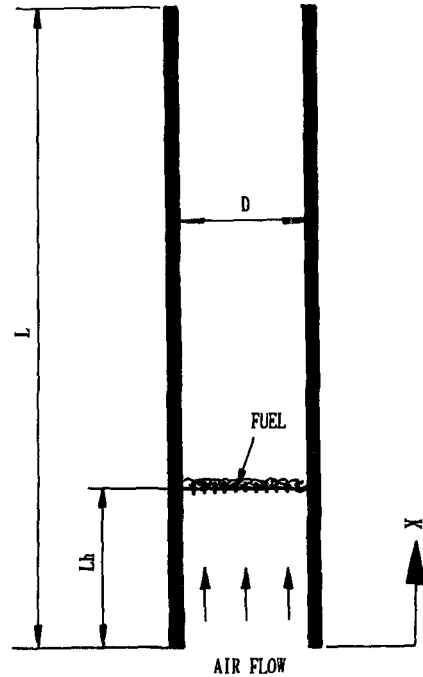


Fig. 1 Rijke type pulse combustor

연료는 자동흡입배출이 되지 않으므로 송풍기와 연료공급장치에 의하여야 한다. 따라서, Rijke형 맥동연소기는 일반연소기와 종래의 폭발형 맥동연소기의 혼합형으로서 석탄과 같은 고체연료의 맥동연소에 적합한 것임을 알 수 있다. 이러한 Rijke형 맥동연소기에 관한 연구는 최근에 시작된 것으로서 초보적인 단계에 불과하다.

고체연료의 맥동연소에서 연소율(combustion rate)이나 연소효율(combustion efficiency) 등 총괄적인 연소특성의 연구도 중요하지만 연소과정에 관한 연구가 더욱 필요하다. 미분탄의 맥동연소에서 연소속도가 빨라지는 원인을 맥동류에 의하여 열확산과 물질확산이 빨라지고 연소가스의 제거가 빨라지기 때문으로 설명하고 있다. 그러나, 연소과정에 관한 체계적인 연구를 찾아보기 어렵다. Lyman⁽⁸⁾은 Helmholtz 공명관에 미분탄 하나를 고정하고 스피커로 맥동진폭 1.5m/s의 음장을 가한 상태에서 연소과정을 열복사 강도(intensity)를 검출하여 맥동과 비맥동의 연소과정을 비교 연구하였다. 그 연구에 의하면 착화 후 재(ash)가 입자의 표면에 쌓이기 전의 연소속도는 맥동에 의하여 20~30% 증가하나 재가 쌓이면 맥동의 영향이 없으며 연소속도는 맥동속도의 변위진폭(displace-

ment amplitude)이 클수록 증가하는 것으로 보고 되었다.

그러나, 이 연구는 미분탄 하나에 관한 연구일 뿐만 아니라 평균유속이 없고 실제맥동보다 음압이 1/10 정도로 낮은 150dB하에서 이루어진 것으로서 미분탄의 맥동연소과정의 이해에는 다소의 도움이 되겠지만 본 연구와 같이 큰 탄입자를 쌓아 놓고 연소시키는 화격자(fire grate) 연소방식에서의 맥동연소와는 큰 거리가 있다.

따라서, 본 연구는 석탄의 맥동연소과정을 비맥동연소와 비교실험을 하여 연소특성을 가지적으로 관찰하고 연소율 등의 연소특성을 구하며 고체연료의 맥동연소과정을 밝히고 맥동연소기 개발의 기초 자료를 얻는데 목적을 두었다.

2. Rijke형 맥동연소기의 작동원리

Rijke 진동은 상승기류가 있는 기주의 1/4 위치에 열원이 있을 때 발생하는 음향적인 자려진동으로서 열음향진동(thermoacoustic oscillation)의 대표적인 현상이다^(6,9). 기주내에 형성되는 음장은 양 끝에서 경계조건을 만족하는 정재파(standing wave)로서 기본진동은 파장이 관길이의 2배가 되므로 길이가 L 인 관의 경우 n 차 모우드의 진동수 f 는 다음 식으로 표현할 수 있다⁽¹⁰⁾.

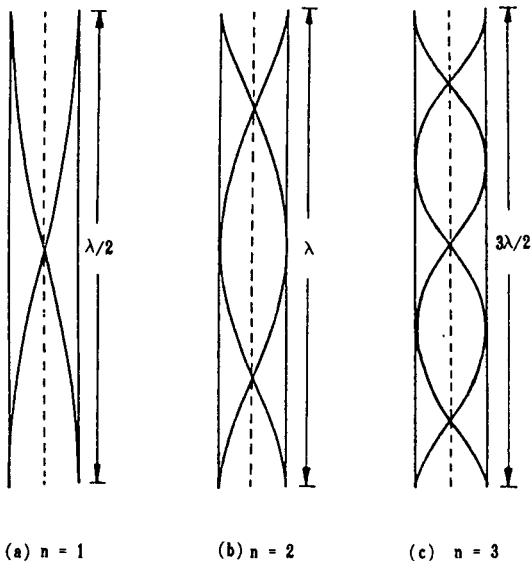


Fig. 2 Acoustic mode shape for the particle velocity in an air column, where λ is the wave length

$$f = nc/2L \quad (1)$$

식에서 관의 지름이 큰 경우에 관길이는 관끝의 개구부의 영향을 고려한 유효길이로 대체되어야 한다. 모우드 형상(mode shape)은 관의 끝에서 음압이 0이 되어야 하므로 음압(acoustic pressure) p 와 입자속도(particle velocity) u 에 관하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(x, t) = \rho c U \sin(nx/L) \cos(\omega t - \pi/2) \quad (2)$$

$$u(x, t) = U \cos(nx/L) \cos(\omega t) \quad (3)$$

식에서 ρ 는 기체의 평균밀도, ω 는 각 진동수 $2\pi f$ 를 뜻하며, 입자속도의 진폭에 관하여 모우드 형상을 도시하면 Fig. 2와 같다.

열음향 파워의 생성을 위해서는 음압이 높을 때 가열되거나 음압이 낮을 때 냉각되어야 하며 이것을 Rayleigh 조건이라고 한다^(6,9,11). 그런데 열공급은 음의 입자속도에 대한 응답이다. 즉, 기류의 흐름에 음장이 중첩되어 있는 상태에서 음(sound)의 입자속도가 정(positive)일 때는 유속이 더 커지므로 열전달과 연소에 의한 열공급이 증가하게 될 것이며 입자속도가 부(negative)일 때는 그 반대로 될 것이다. 이러한 열공급의 변동량의 진폭은 입자속도의 진폭에 비례하나 위상이 늦어지게 되므로 열공급을 q 라고 할 때 시간적인 변화는 위상지연(phase delay) ϕ 를 이용하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$q(t) = kU \cos(nLh/L) \cos(\omega t - \phi) \quad (4)$$

식에서 k 는 비례상수를 나타내며 Lh 는 열원의 위치를 나타낸다. 여기서 열원부의 길이는 파장에 비하여 매우 짧은 집중열원으로 가정하여 열원 주위의 음압과 입자속도는 균일한 것으로 본 것이다. 또한, 가열에 의한 온도의 변화가 음장의 모우드 형상에 미치는 영향은 무시하였다.

Rayleigh 조건에 따라 열음향적인 자려진동이 발생하기 위해서는 음압과 열공급의 위상차가 $\pi/2$ 이내로 되어야 한다. 그런데, 위상지연은 다음 범위에 있다고 할 수 있다.

$$0 < \phi < \pi \quad (5)$$

그 까닭은 입자속도에 대한 열공급의 위상지연은 기류의 맥동에 대한 연소반응과 열전달 응답의 지연에 의한 것이며, 열전달의 응답지연은 $0 < \phi < \pi/2$ 에 있는 것이 밝혀졌고⁽¹²⁾, 연소반응에 의한 지연은 물질확산의 지연에 의하여 지배되며 열확산과 유사하기 때문에 전체적인 위상지연을 $0 < \phi < \pi$ 로 놓으면 안전하다고 할 수 있다. 따라서, Rayleigh

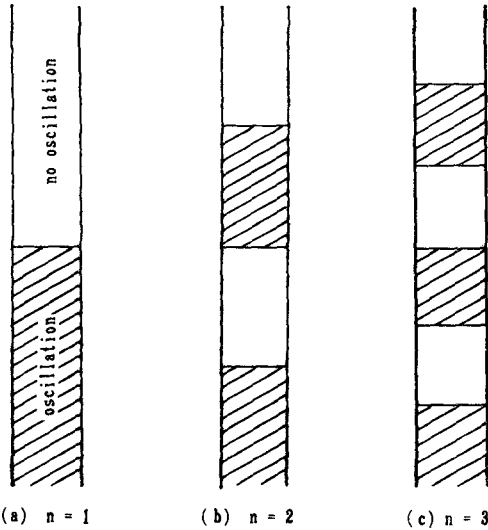


Fig. 3 Heat source positions possible to induce the Rijke oscillation

조건을 만족하는 가열기의 위치는 식 (2)에 $x = Lh$ 를 대입한 것과 식 (4)로부터 다음 부등식으로 나타난다.

$$m/n < Lh/L < (m+1/2)/n, \\ m=0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

따라서, $n=1$ 인 기본진동의 경우 가열기의 위치는 다음 범위에 있을 때이며

$$0 < Lh < L/2 \quad (7)$$

모우드의 차수에 따라 진동의 발생이 가능한 열원의 위치를 표시하면 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 진동의 발생이 가능한 위치에 열원이 있더라도 열원에서 생성되는 음향 파워가 그 모우드를 소멸시키는 파워, 즉 관벽이나 개구부로부터의 손실되는 파워보다 크지 않으면 열음향진동은 발생될 수 없다. 어떤 모우드 형상의 미소진폭의 외란(disturbance)에 대하여 열원에서 생성되는 음향 파워가 소멸되는 파워보다 클 때 진동이 발생되고, 진폭이 증가하면 파워의 생성과 소멸은 비선형적(nonlinear)으로 되어 두 값이 평형되는 조건에서 정상 상태진동을 하게 된다⁽¹³⁾. 아직 정상 상태진동의 진폭을 정량적으로 구한 연구는 없다.

3. 실험방법

Rijke형 맥동연소에서 연소과정을 가시적으로 관찰하고 연소특성을 구하기 위한 실험장치의 개략도

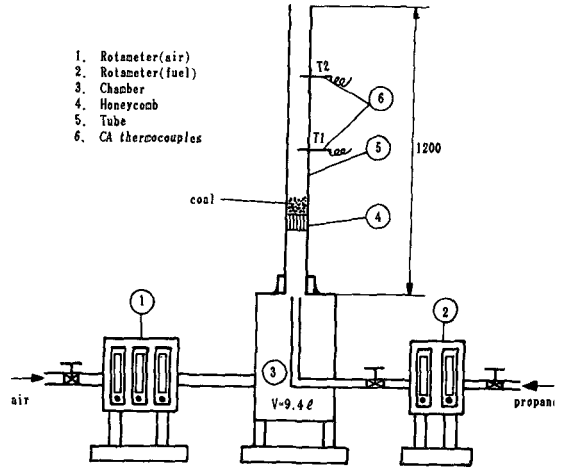


Fig. 4 Schematic of the experimental setup

Table 1 Ultimate analysis of the brown coal

Carbon (C)	63.16 (%)
Hydrogen (H)	3.97 (%)
Oxygen (O)	14.68 (%)
Nitrogen (N)	0.63 (%)
Sulphur (S)	3.21 (%)
Ash (A)	14.35 (%)

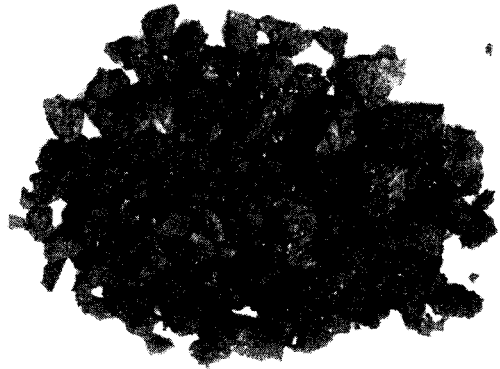


Fig. 5 Photograph of the brown coal

는 Fig. 4와 같다. 사용연료는 Table 1과 같은 조성을 갖는 Fig. 5 모양의 평균직경 5mm 정도의 갈탄(brown coal)이다. 화격자 역할을 하는 길이 5 cm인 하니콤의 주요제원은 Table 2와 같다.

Table 2 Details of the honeycomb

Material	Cordierite ceramic 2MgO·2Al ₂ O ₃ ·5SiO ₂ (magnesium aluminosilicate)
Thermal expansion coefficient(25-1000°C)	12×10 ⁻⁷ /°C
Conductivity Kr Kz	0.00005kcal/m.s. °C 0.0001 kcal/m.s. °C
Specific heat	0.25kcal/kg °C
Melting point	1410°C
Density	61kg/m ³
Thickness	0.16mm
Mesh	400/linch ²

연소관의 길이는 1200mm로 일정하나 지름은 두 종류의 것을 사용하였다. 하나는 지름 34mm, 두께 2mm인 파이렉스 관을 사용하여 가시적인 측정을 주로 하였다. 하니콤폴을 기주의 1/4 위치에 고정하고 연료 30g을 넣은 후 프로판 가스를 이용하여 점화시킨다. 압축기에서 공급되는 공기량을 유량조절변으로 일정하게 맞춘 후 연소상황을 관찰하고 진동압력은 관 중앙에 안지름 1mm의 삽입관에 연결된 압력변환기로 검출하고 증폭기를 거쳐 FFT에 연결하여 분석한다. 연소는 하향연소식으로 진행되며 연료가 완전히 점화되어 5cm 높이에 도달했을 때부터 1cm 높이에 이를 때까지 4cm 높이의 약 22g의 연료가 연소되는데 소요되는 시간을 3번 측정하여 평균연소시간을 구하고 연소율(combustion rate)을 계산하였다.

맥동연소와 비교하기 위하여 비맥동 연소에 관해서도 맥동의 경우와 같은 방법으로 실험하였다. 같은 연료공기조건에서 비맥동연소는 하니콤폴 아래쪽에 유리섬유를 넣어 음향 파워를 감쇠시킴으로써 가능하였다.

또 하나는 지름 39mm, 두께 2mm인 스테인리스 강관을 사용하여 연소실내의 온도변화의 측정에 목적을 두었다. 공급연료의 양은 35g이며 온도측정은 관의 바닥에서 600mm 지점인 관 중앙과 900mm 지점에 CA 열전대를 관의 측면으로부터 삽입하여 온도의 변화를 측정하였다. 역시, 맥동과 비

맥동을 비교하기 위하여 비맥동상태로도 실험하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 진동특성

연소대를 기주의 1/4 위치에 놓을 때, 모든 연소 조건에서 연료가 점화된 후 왜곡이 없는 정현파(sinusoidal wave)의 기본진동이 발생하였다. 진동특성에 있어서 파이렉스 관과 스테인리스 관의 지름의 차에 따른 영향은 거의 무시할만 하였다. 진동초기에는 진동수 160Hz에 음압이 가장 높은 반절점(antinode)인 관 중앙의 음압은 3000Pa 정도였으며 연소가 진행되어 연소실의 온도가 높아지면서 진동수는 180Hz 음압은 7000Pa까지 증가하였다. 연소가 거의 끝날 무렵에 음압이 최대로 된 후 연료가 완전히 없어질 때까지 서서히 음압이 감소하였다. 연료가 거의 다 탈 무렵에 음압이 최대로 증가하는 것은 연료자체에 의한 흡음이 최소로 되는 반면 하니콤폴이 가장 많이 가열되어 음향 파워의 생성은 가장 크게 되기 때문으로 판단된다. 기본진동의 진동수와 음속의 관계를 식 (1)에서 구하면 180Hz일 때 음속은 $c=432\text{m/s}$ 인 것을 알 수 있고 여기에 대응하는 공기(연소가스가 혼합되어 있지만 그 양이 적으므로 무시하고 순수한 공기로 가정)의 온도는 $T_0=465\text{K}$ 인 것을 알 수 있다. 기본진동에서 관 중앙에서 음압과 1/4 위치에서 입자속도 사이의 관계는 식 (2), (3)에서 $U=P/(\sqrt{2\rho c})$ 이므로 465K에서 물성치와 음압의 범위를 대입하면 맥동속도의 진폭은 다음 범위에 있음을 알 수 있다.

$$6\text{m/s} < U < 16\text{m/s} \quad (6)$$

이러한 속도진폭(velocity amplitude)은 평균음속(2m/sec 이하)보다 훨씬 큰 값인 것을 알 수 있다. 이때에 변위진폭(displacement amplitude) A 는 속도를 각 진동수로 나누어서 구할 수 있으므로 180Hz에 대하여 계산하면 변위진폭은 다음 범위에 있다.

$$5\text{mm} < A < 14\text{mm} \quad (7)$$

이러한 변위진폭은 연료입자의 평균반지름(약 2.5mm)보다 훨씬 큰 값을 알 수 있다.

고차($n>1$) 모우드의 발생여부를 확인하기 위하여 연소대인 하니콤폴의 위치를 축방향으로 이동하면서 진동의 발생유무를 실험한 결과 2차 모우드는 Fig. 3의 위치에서 어렵지 않게 발생하지만 3차 모

우드는 거의 나타나지 않으며 4차 이상의 고차 모우드는 관찰되지 않았다.

진동의 세기는 공급되는 공기의 유속에는 별 영향을 받지 않았다. 그러나, 유속이 2m/s 이상으로 되면 연료가 팽압에 의하여 부상되기 시작하며 진동특성도 매우 불안정하여 진폭이 계속 크게 변화하는 것을 알 수 있었다.

4.2 연소특성

맥동연소에서 연소상태를 관찰한 결과 다음 사실을 발견하였다. 맥동이 발생하면 연료들은 무질서한 운동을 일으키며 연소 중인 입자들은 점화가 되지 않은 입자보다 훨씬 강한 맥동을 일으켜 다소 부상된 상태에서 연소된다. 연료가 착화되어 연소에 가담하는 속도가 맥동이 없을 때보다 크게 증가하여 짧은 시간 내에 연료전체가 동시에 연소되는 상황이 된다. 연소층은 마치 끓는(boiling) 듯하고 연료는 부유물처럼 보였다. 연소가 끝날 즈음에는 연료가 큰 진폭으로 출렁이면서 때로는 10cm 이상까지 분수처럼 솟아 오르기도 하였다. 맥동이 없는 경우에 비교하면, 같은 연소율에서 화염의 길이는 짧아지며 배기 중에 그을음이 거의 보이지 않는다. 재가 연료표면에 쌓이지 않으며 연소실 벽에도 재나 그을음이 쌓이지 않고 쌓였던 것도 깨끗이 닦아내는 것을 관찰할 수 있었다.

한편, 비맥동 연소에서는 부분적이고 간헐적인

입자의 운동을 제외하면 끝까지 연료는 고정된 위치에서 연소된다. 연소는 하향으로 거의 일정한 속도로 진행하며 연소층의 부피도 거의 일정하게 유지된다. 연료표면에 재가 쌓이며 화염은 길게 뻗치며 그을음이 많고 연소실 벽에도 그을음이 쌓인다.

대표적인 연소상태에서 맥동과 비맥동을 비교하면 Fig. 6의 사진과 같다. 그림에서 비맥동연소의 경우에는 공기량에 따른 화염의 길이가 변하지 않고 거의 일정한 것을 알 수 있다. 화염의 형상은 층류확산화염이 집합된 것 같이 보인다. 맥동연소 시에는 공기의 유속이 낮은 $U_0=0.55\text{m/s}$ 의 경우에는 노출시간을 크게 하지 않으면 촬영이 안 될 만큼 불꽃이 어둡고 연료층 위로 올라오지 않기 때문에 사진에서 밝은 부분은 연료속에 묻힌 불꽃이다. 그 이유는 공기량이 부족하여 연소에 의한 열 발생은 적은데 맥동에 의하여 열전달이 커지므로 연소온도가 저하되어 화염이 어두워지는 동시에 연소속도도 낮아지는 것으로 사료된다. 사진에서 화염 가운데 떠 모양의 어두운 부분은 연소초기맥동이 나타나기 전에 쌓인 그을음이며 맥동연소가 진행되면 자연 제거되었다. 공기속도가 0.91m/s의 경우에는 밝은 화염이 형성되었으며 이때는 비맥동의 경우와 연소율은 비슷하나 화염의 길이가 현저히 작은 것을 알 수 있다. 연소가 시작되면서 곧 연료전체가 착화되어서 사진에서처럼 끓는듯이 연소되었다. 공기속도가 1.82m/s인 경우에는 연료전

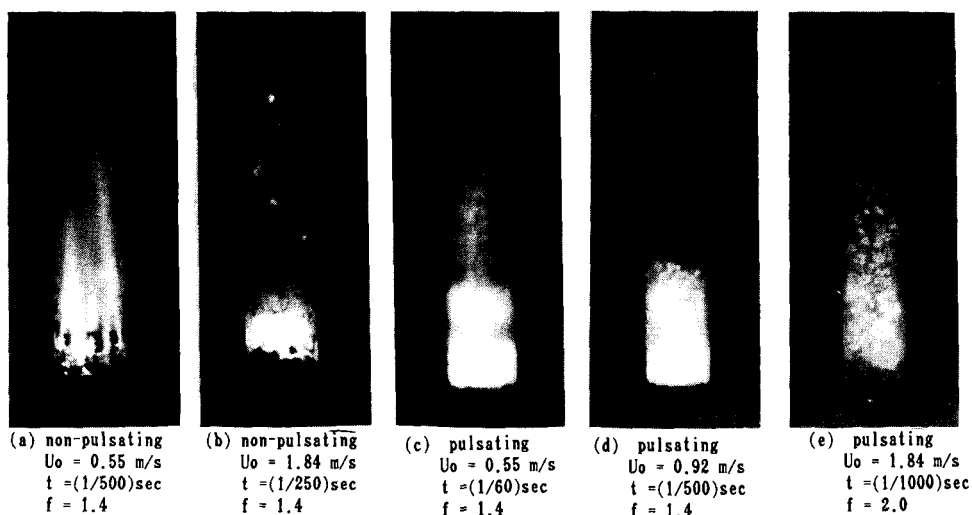


Fig. 6 Photograph of the typical flame shape of pulsating and non-pulsating combustion (t : exposure time, f : focal ratio)

체가 더 높기 부유된 상태에서 연소되는 것을 볼 수 있다. 이때의 연소율은 비맥동의 2배에 이르지 만 불꽃길이는 비슷한 것을 알 수 있다. 이것보다 공기공급을 더 높이면 연료입자가 부상하여 밖으로 비산되는 현상이 나타난다.

연료의 연소율(화격자 면적당)을 도시하면 Fig. 7과 같다. 연소율은 전술한 바와 같이 30g 정도의 연료를 넣고 하향연소시킬 때 바닥면에서 5cm 높이서부터 1cm 높이까지 약 22g의 연료가 연소되는데 걸린 시간으로부터 평균연소속도를 구한 것이다. 처음에는 점화되어서부터 연소가 끝날 때까지로 하였더니 결과에 큰 차는 없었으나 연소초기와 말기에 특히 크게 되는 비정상적인 연소의 영향을 가급적 줄이기 위하여 위의 방법을 취하였다. 실험에서 비맥동연소의 경우는 연소면이 일정한 속도로 미연연료층으로 전파하기 때문에 측정이 수월하였으나 맥동연소에서는 연료전체가 거의 동시에 부유 상태로 연소하기 때문에 정확한 측정이 어려웠으며 눈짐작으로 남은 연료의 양을 고려하여 시간측정을 할 수밖에 없었다. 같은 조건에서 3번 반복실험을 하여 그 평균으로 연소속도를 구한 것이다. 연소율(또는 연소속도)은 연료량을 화격자 면적(판의 단면적)과 연소시간으로 나눈 것이며, 공기의 유속은 공기량을 단면적으로 나눈 값이다. 비맥동연소의 경우를 보면 실험범위에서 공기량에 관계없이 연소율은 약 $250\text{kg/m}^2\text{h}$ 로서 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이 연소율은 실용되는 화격자 연소식의 석탄연소에서 최대치에 가깝다. 맥동연소의 경우는 연소율이 공기량에 거의 비례하여 증가하다가 유속이 2m/s 가까이 될 때 $530\text{kg/m}^2\text{h}$ 까지 되는 것을 볼 수 있다. 이것은 비맥동연소의 경우에 비

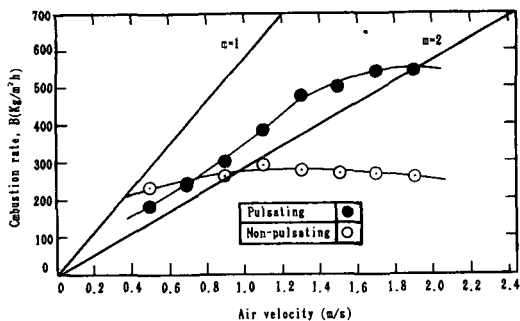


Fig. 7 The combustion rate of the pulsating combustion in comparison with that of the non-pulsating combustion

하여 2배나 큰 연소율이다. 한편 0.5m/s 로 유속이 낮을 때 맥동연소에 의한 연소율이 비맥동보다 낮은 것은 Fig. 6의 사진설명에서 언급한 바와 같이 맥동에 의한 열전달이 증가하여 연소온도가 매우 낮아지기 때문에 연소속도가 오히려 저하되는 것으로 본다.

Fig. 7에 나타낸 공기비(air ratio) 선도는 종축의 연소율에 필요한 이론공기의 공급률을 Table 1의 연료의 조성으로부터 계산하여 구한 것이다. 그림에서 맥동연소의 경우는 공기비가 2 이하이며 유속이 1.5m/s 까지는 $m=1.7$ 정도로 일정하다고 할 수 있다. 비맥동연소의 경우는 유속 0.4m/s 정도 이상으로 공급되는 공기는 모두 과잉공기로 되는 것을 알 수 있다. 맥동의 경우라 하더라도 공기비 1.7은 실용되는 연소장치에 비교하여 낮은 값이라고 할 수는 없다. 화격자 면적이 더 넓어지고 일정한 율로 연료가 공급되어 연소실온도가 높아지고 완전한 정상연소상태라면 과잉공기는 훨씬 줄어들 것으로 본다.

Fig. 8은 맥동과 비맥동연소를 대비하여 관 내의 두 점에서의 온도 T_1 과 T_2 를 기록한 것이다. 이 경우는 지름 39mm 의 스테인리스 관을 사용하였기 때문에 연소상황을 직접관찰하지는 못하였다. 일정량의 연료를 넣고 하향연소시킴으로 열적인 정상상태는 얻을 수 없는 것을 알 수 있으며, 연소실의

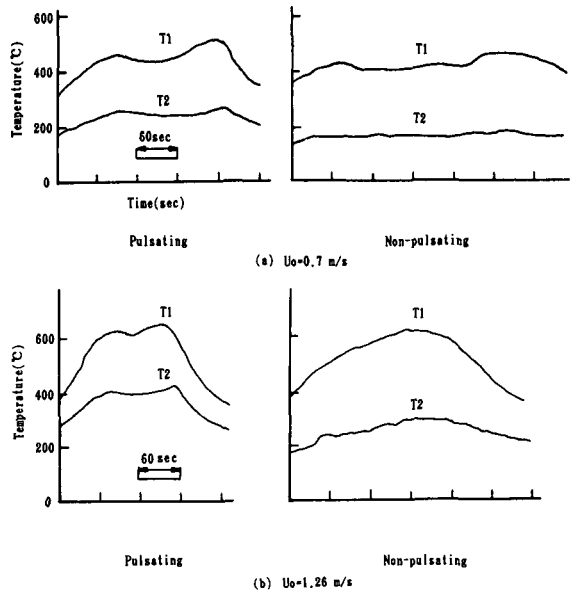


Fig. 8 Temperature variation with time

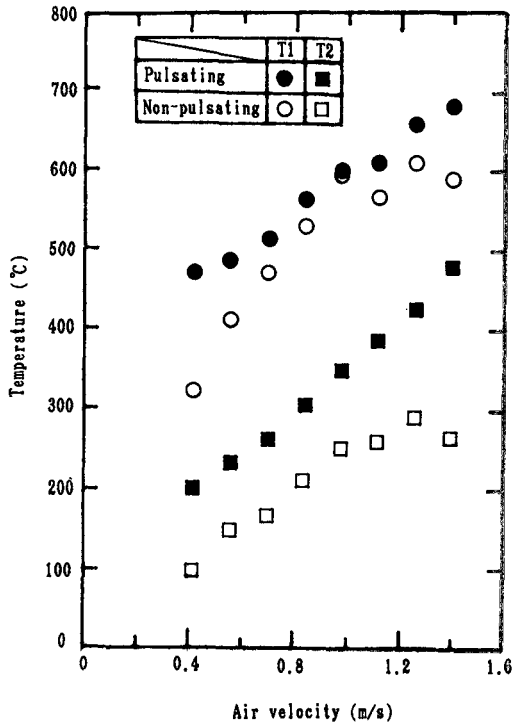


Fig. 9 Variation of the peak temperatures with the air velocity

온도는 서서히 증가하다가 연소말기에서 거의 최대로 된 후 다시 내려가게 된다. 맥동연소의 경우에 온도가 M자형으로 두 개의 극점이 있는 것은 진동이 시작되면 곧 연료전체가 동시에 연소되므로 처음에는 휘발분이 연소한 후 고정탄소가 연소되는데에 한 원인이 있을 것이며, 또한 연소초기보다 말기에 진동의 진폭이 2배 가까이 높아지므로 연소속도가 더 커지는데에 원인이 있는 것으로 사료된다. 온도변화로부터 연소시간을 대략적으로 추정하여 연소율을 구하여 Fig. 7과 비교하였더니 정량적으로 일치하지는 않지만 매우 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 T_1 과 T_2 의 최대치를 유속에 따라서 맥동과 비맥동연소를 대비하여 도시한 것이다. 그림에서 맥동시에 온도가 현저히 상승하는 것을 알 수 있다. 맥동연소시 공기유속이 증가하면 연소온도도 거의 선형적으로 증가하므로 연소율이 계속 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나, 비맥동연소의 경우에는 유속이 1.2m/s 정도에서부터 더 이상의 온도상승이 없이 오히려 감소하기 시작하는 것은 연소율이 Fig. 5에서처럼 거의 일정하게 되는 것을 반영

한다.

5. 결 론

이상과 같이 Rijke형 맥동연소기에서 일정량의 연료를 하니콕 위에 쌓아 놓고 하향연소시키면서 석탄의 맥동과 비맥동의 연소특성을 실험한 바 다음 결론을 내릴 수 있다.

(1) 맥동연소일 때 연료는 부상한 상태에서 끓는 듯이 심한 요동을 하면서 연소된다. 미연연료 층으로 연소면의 전파속도가 매우 빨라서 연료전체가 동시에 연소되는 양상을 보인다. 재가 쌓이지 않으며 그을음의 발생이 적고 연소실 벽에 그을음이 끼지 않는다.

(2) 맥동연소시 연소율은 공기유속이 빠를수록 증가한다. 그러나, 비맥동연소의 경우에 연소율은 공기유속에 관계없이 거의 일정하다.

(3) 맥동연소시 연소율이 증가하여도 화염의 길이는 거의 변화가 없으며, 배기가스의 온도는 비맥동의 경우에 비교하여 현저히 증가한다.

(4) 공기공급이 적은 경우에는 맥동연소일 때의 연소속도가 비맥동연소보다 더 작게 되는데 이것은 열전달 증가에 의한 연소온도저하 때문이다.

후 기

본 논문은 1987~1987년도 한국과학재단의 연구비 지원에 의하여 수행된 연구의 일부분이며, 동재단 관계자 여러분께 감사한다.

참 고 문 헌

- (1) Putnam, A.A., 1979, "A Review of Pulse-Combustor Technology", Proc. Symposium on Pulse Combustion Technology for Heating Applications, Nov. 29~30, Argonne Nat'l Lab. pp. 1~21.
- (2) 櫻井耕三, 1985, "パルス 燃焼とその應用", 省エネルギー, Vol. 37, No. 10, pp. 9~15.
- (3) Severyanin, V.S., 1969, "The Combustion of Solid Fuel in a Pulsating Flow", Thermal Engineering, 16(1), pp. 6~8.
- (4) Hanby, V.I. and Brown, D.J., 1968, "A 50lb/h Pulsating Combustor for Pulverized Coal", Jr. Inst. Fuel 41, pp. 423~426.
- (5) Feldman, K.T., 1968, "Review of the Literature on

- the Rijke Thermoacoustic Phenomena", *J. Sound Vib.* Vol. 7, No. 1, pp. 83~89.
- (6) Zinn, B.T., Miller, N., Carvalho, J.A. and Daniel, B. R., 1982, "Pulsating Combustion of Coal in a Rijke Type Combustor", 19th Symposium on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1197~1203.
- (7) Cavalho, J.A., 1983, "Investigation of the Characteristics of a Coal Burning Rijke Type Pulsating Combustor", Ph. D. Thesis, Georgia Institute of Technology.
- (8) Lymann, F.A., 1980, "Enhanced Combustion of Fossil Fuel Particles and Droplets in Oscillating Flow", Research report, ET-78-G-01-3303.
- (10) Kinsler, L.E., Fery, A.R., Coppens, A.B., and Sanders, J.V., 1980, *Fundamentals of Acoustics*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York.
- (11) Kwon, Y.P. and Lee, B.H., 1985, "Stability of the Rijke Thermoacoustic Oscillation", *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 78(4), pp. 1414~1420.
- (12) Kwon, Y.P. and Lee, B.H., 1986, "Heat Transfer Response of an Isothermal Cylinder in Fluctuating Cross Flow", *Trans. KSME*, Vol. 10, No. 5, pp. 706~712.
- (13) 瀬川頼英, 1986, "音響共鳴振動燃焼の振動壓力の豫測法", *日本機械學會論文集(B編)* 第53卷, 第486號, No. 86-0290A.