

# 가스 스윙버너의 공연비 제어에 관한 연구

김인규\* · 김영수\* · 김양호\* · 김경수\* · 김지원\*\*

## Study on the control of fuel-air ratio of gas swirl burner

I.K. Kim, Y.S. Kim, Y.H. Kim, K.S. Kim, J.W. Kim

**Key Words :** Control, Fuel-Air Ratio, Excess Air Ratio, Combustion Fan, Gas Valve, PD Control

### Abstract

In this paper, our main issue is that establishing the control procedure of continuous gas flow rate according to combustion fan RPM. For this, first, we decide the optimum operating condition of gas swirl burner through analysis of combustion characteristics - thermal efficiency, combustion efficiency and exhaust gases such as CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and THC. Second, fuel gas flow rate of gas valve is decided with considering excess air ratio and combustion fan RPM is decided by the target of combustion air flow rate. Finally, experimental operating equation is acquired by regression for gas valve and combustion fan. This equation is the control equation of continuous gas flow rate and always gas flow rate is decided by combustion fan operating RPM.

### 1. 서론

가스 온풍 난방기는 열원은 가스의 연소열을 이용하고, 공기를 열 전달 매체로 하여 열 교환기를 통하여 난방을 하는 기기로서, 그 시장 규모는 IMF에도 불구하고 계속 성장하고 있다. 이의 주된 원인으로서는 전국적 가스 보급망의 확충과 더불어 Running Cost를 석유보다 약 40%이상 절감할 수 있다는 경제성과 사용이 편리하고, 냄새, 매연 등

이 없다는 청결함 등을 들 수 있다. 그러나 가스 사용에 따른 폭발 위험성이 타 기기에 비해 항상 높게 상존하고 있기 때문에 취급 및 기기의 운전에 상당한 주의가 요망된다고 하겠다.

일반적으로 가스 온풍 난방기에 요구되는 기본 성능은 첫째, 실내 온도변화에 능동적으로 동작되도록 하여 항상 사용자가 원하는 목표 온도로 일정하게 유지하여 쾌적함을 느낄 수 있게 하여야 한다는 것과 둘째, 사용자가 쉽게 제어 가능하여 편리하고 안전하게 사용할 수 있도록 하여야 한다는 것이다.

이의 실현을 위해서는 실내온도의 변화에 따라서 필요한 열량을 안정적으로 연소시킬 수 있는, 열량 가변 폭이 넓

\* LG 전자(주) 홀어플라이언스 사업본부 연구소 연소팀

\*\* LG 전자(주) 홀어플라이언스 사업본부 연구소 제어팀

은 가스 버너의 개발 및 열량을 안정적으로 안전하게 가변 시킬 수 있는 열량 제어 기술의 개발이 동시에 이루어져야 한다.

본 연구의 초점은 가스 버너의 열량 제어 기술에 관한 것으로, 본 연구에 사용된 Swirl Type의 가스버너에 대한 연구 내용은 기 보고한 바 있다.<sup>(1),(2),(3)</sup>

현재 시판되고 있는 가스 난방기기의 열량제어 방식을 살펴보면 Step 제어 또는 On-Off 제어 2 가지 형태가 일반적이다. 그러나 이러한 제어방식은 다음과 같은 문제점을 안고 있다. 첫째, Step 제어는 연속적으로 열량을 변화 시키지 못하고 정해진 몇 단계의 열량만을 낼 수 있어 실내 난방부하 변동에 대한 쾌적성이 저하된다. 또한, 실내 온도 변화에 따른 열량 단계 변화 시 연소용 공기공급 팬과 가스 공급용 가스밸브를 각각 구동 시켜 최적 공연비로 맞추어 가면서 열량을 가변 시켜야 하기 때문에 목표열량 도달에는 시간 지연이 필수적으로 발생할 수 밖에 없다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 열량 가변 Step을 조밀하게 설정하여야 하며, 이를 위해서는 각 Step 별로 제어 값을 마이컴에 저장시켜 놓아야 하나, 마이컴의 용량 한계로 인하여 비현실적이다. 둘째, On-Off 제어는 실내 부하에 따른 빈번한 On-Off로 인하여 실내온도 편차가 크고, 이로 인하여 쾌적성이 저하되며, 에너지 이용효율이 떨어짐은 물론 특히 체감 소음이 증가하는 문제점이 있다. 또한 실제 Field에서 빈번하게 일어날 수 있는 가스 공급압력 및 인가전압의 변동과 설치 조건 변화 등에 대하여 1 Point의 초기 설계 값으로서는 대응하기가 힘들며, 특히, 안전성에 심각한 문제를 야기할 수도 있다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 제어 특성 실험식에 의하여 최적의 공연비로 실내온도 변화에 대응하여 연속적이면서, 신속하고, 안정적으로 열량을 제어할 수 있도록 하였다. 이의 실현을 위해서 먼저 버너의 연소 안정 폭 및 열량 가변범위 내에서의 최적 운전 조건을 도출하고, 최적 운전조건에 따른 연소용 공기량과 열량에 대한 관계 실험식을 구하여, 이를 마이컴의 제어값과 matching시킨 뒤, 최종 제어 특성식을 도출 함으로서 최적 공연비에 따라서 연속적으로 열량을 가변할 수 있도록 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 버너의 화염 안정성을 바탕으로 하여 운전조건 설정을 위해 사용된 연소특성 실험 장치도 이다. 이 실험장치는 연소용 공기 공급계와 연료 공급계, 연소를 하여 배기가스를 배출하는 Test Section 부인 연소시스템과 연소 시스템에서 발생하는 배기가스 성분 분석, 온도 측정 및 화염 가시화 등을 위한 측정계로 크게 4부분으로 이루어져 있다.

이때 사용된 연소용 공기 유량 측정에는 충류유량계(Sokken 사;LFE-25B)를 사용하였고, 연료 유량 측정에는 표 1.에 제시된 성분의 LNG용 MFC 유량계(Tylan;FM3921V)를 사용하였으며, 연소 시스템에서 발생하는 배기가스 성분 분석은 Horiba 사 COPA 2000 모델의 가스 분석기를 이용하여 CO(NDIR 방식), CO<sub>2</sub>(NDIR 방식), O<sub>2</sub>(자기압력식), NO<sub>x</sub>(NDIR 방식)를 측정하였고, THC(수소 FID 방식)분석은 역시 Horiba 사 FIA-510 모델

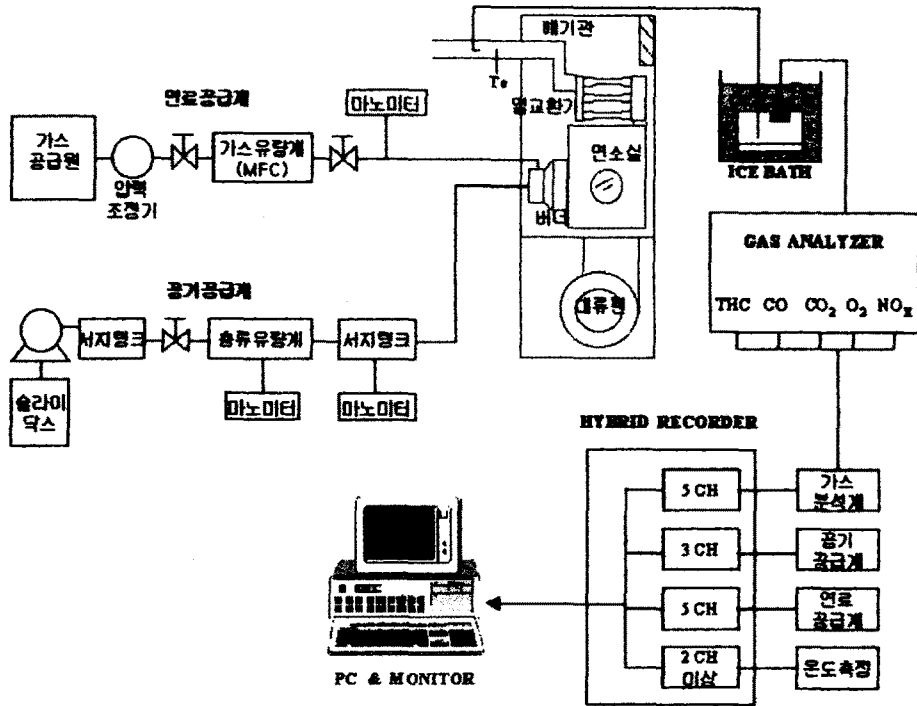


Fig. 1 연소특성 실험 장치도

을 이용하여 측정하였다. 또한 화염 가시화는 일반 CCD 카메라(Sonny, CD-VX1)를 이용하여 연소실 측면 및 정면에 설치된 가시화 창(석영 유리)을 통하여 실험조건 변화에 따른 화염 거동상태를 감시하였으며, 열효율<sup>(4)</sup> 측정을 위하여 K Type( $\phi$  0.3mm)의 열전대를 사용하였다. 한편, 가스 분석 시 가스분석관로 상의 수증기 제거를 위하여 연소시스템과 가스 분석기 사이 냉각장치를 설치하여 연소 배기가스 중의 수증기가 가스 분석기 내로 유입되지 못하도록 하였다.

모든 측정 데이터는 Hybrid Recorder를 통하여 PC로 들어가게 되어 있고 여기서 모든 데이터를 분석하게 된다.

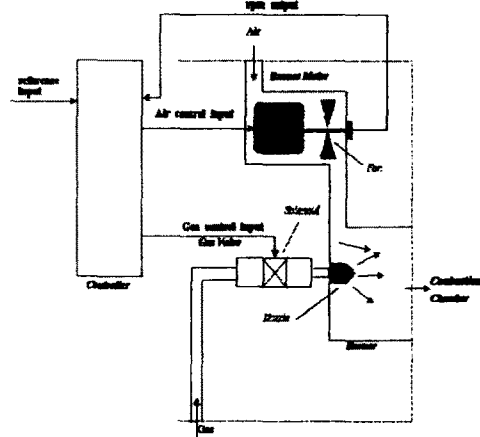


Fig. 2 공연비 제어 시스템

Fig. 2는 버너의 운전조건 설정 후 설정된 목표 운전조건에 맞도록 연소용 팬 회전수와 유량과의 관계 및 가스밸브의 전기적인 특성과 유량과의 관계를 도출하여 연속 열량 가변제어 실험을

위한 공연비 제어 시스템을 나타낸다. 이 시스템은 현재 시판되고 있는 가스온풍 난방기의 공연비 제어 시스템과 동일한 것으로서 연소용 공기를 제어하기 위한 제너레이터 방식의 회전수 검출 센서와 연소용 팬과 모터, Swirl Type의 보염기, 전기 점화장치, 염 검지기, 연료를 공급 및 조절하는 비례제어용 가스밸브 및 전체 시스템을 제어하는 원칩 마이컴(One-chip microcomputer)으로 구성되어 있다. 여기서 제어장치는 펄스폭 변조(PWM)로 가스밸브 내부의 솔레노이드의 자장세기를 변화시켜 연소실로 공급되는 가스량을 조절하며, 연소용 모터에 공급하는 전압을 제어하여 모터의 회전수를 변화시켜 연소실로 공급되는 연소용 공기량을 조절한다. 연소용 모터의 회전수를 피드백 신호로 이용하기 위하여 제너레이터 방식의 회전수 검출센스가 사용되었다. 이렇게 구성된 공연비 제어 시스템은 가스밸브에서 조절된 가스와 연소용 팬에서 공급된 공기가 적절한 공연비로 보염기에서 혼합된 후 전기 점화장치에 의하여 점화가 되고, 연소실에서 연소하게 되며, 연소된 배기가스는 열교환기를 통하여 옥외로 배출하게 된다.

## 2.2 실험방법

Fig. 3은 공연비 제어식 도출을 위한 설계 순서를 나타낸 것으로서 공연비 제어식 도출을 위한 설계 순서는 총 4 단계로 구성된다.

먼저 1 단계는 버너의 운전조건 설정을 위한 단계로서 Fig. 1의 실험장치에서 연료소비량을 일정하게 하고 연소용 공기량을 변화 시켜 가면서 화염 상태, 연소효율, 열효율, 배기가스 농도를 동시에 측정하여 가장 안정된 공통적인

영역 내에서 운전조건을 설정하였다.

2 단계는 1 단계에서 설정된 운전조건

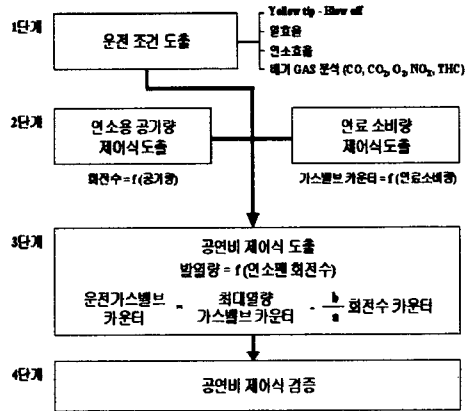


Fig. 3 공연비 제어식 도출 과정

에 맞는 연소용 공기량과 연료소비량을 연소 팬의 회전수와 가스밸브의 전기적 입력량에 대하여 각각 그 특성 관계식을 회귀 분석법에 의하여 도출하였다. 먼저 연소용 공기량은 각각의 연료소비량을 일정하게 유지하면서 목표 가변 회전수에 대한 연소용 공기량 변화 특성을 마이컴이 연소용 모터를 제어할 수 있는 제어 값인 회전수 카운터( $RPM_{cm}$ )에 대하여 도출하였다. 연료소비량 특성은 가스밸브의 비례제어 밸브에 입력되는 전기적 입력량을 마이컴이 제어할 수 있는 제어 값인 가스밸브 카운터( $GV_{cm}$ )에 대하여 연소용 공기량과 연료 소비량을 동시에 변화시켜 가면서 그 특성을 도출하였다.

3 단계는 공연비 제어식을 도출하는 단계로서, 운전조건에 맞는 연소용 공기량과 열량과의 관계를 회전수 카운터( $RPM_{cm}$ )와 가스밸브의 전기적 입력 제어량인 가스밸브 카운터( $GV_{cm}$ )와의 관계식을 도출하여 항상 연소용 팬의 회전수에 따라서 가스밸브의 연료 소비량

이 결정되도록 공연비 운전 제어식을 만들었다.

4 단계는 이렇게 결정된 운전 조건식에 따라 운전을 하였을 때 실제로 목표된 열량 및 연소용 공기량이 나오는 지를 검증하는 단계이다.

본 연구에 사용된 연료는 LNG 이며, 그 조성을 표 1에 나타내었고, 본 연구의 목표는 열량 가변폭이 18,000 kcal/h ~ 25,000 kcal/h 이며, 제어방식은 연속 열량 가변제어 방식을 실현함과 동시에 항상 연소 팬의 회전수에 따라서 거기에 적합한 열량을 내도록 제어하는 것이다.

표 1. LNG 조성

성분	체적분율(vol%)
CH <sub>4</sub>	88.8
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	8.92
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.72
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.56

또한, 이때 기기가 설치되는 Field의 사용 환경 조건을 고려하여 가스 공급 압력(KS 기준: 200<sup>+50</sup><sub>-100</sub> mmAq)의 변동으로 인하여 가스 공급압력이 50mmAq까지 감소하더라도 연소에 이상이 없도록 그 목표를 설정하였다.

### 3. 운전 공연비 제어식 도출

#### 3.1 가스버너 운전조건 도출

Fig. 4는 가스 버너의 운전조건 결정을 위한 연소특성도로서 연료소비량 및 연소용 공기량 변화에 따른 화염의 상태, 열효율, 연소효율 및 CO 배기가스 특성을 함께 나타내고 있고, Fig. 5는 가스 공급압력이 200mmAq의 정상 상태, 열량이 25,000 kcal/h 일 때의 각 공기 과

잉비에서 가스공급 압력만 변화 시켰을 때, 화염의 소염한계를 각 과잉 공기별로 나타내고 있다.

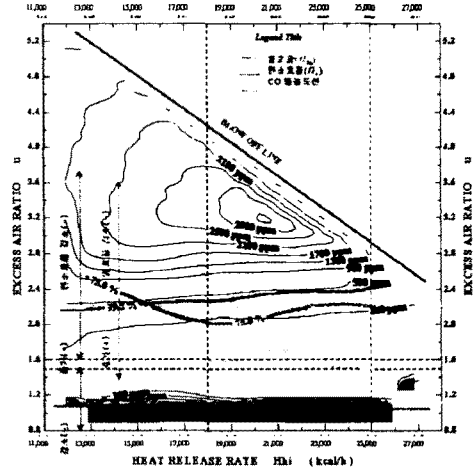


Fig. 4 연소특성도

먼저 Fig. 4에서 CO농도 100ppm 이하, 열효율 75% 이상, 연소효율 99.5% 이상 되는 영역과 가시화된 화염 상태를 고려해 볼 때 가장 안정된 연소영역은 공기 과잉비 기준으로 전 가변 열량

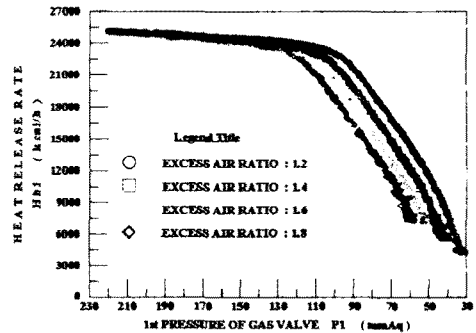


Fig. 5 가스공급압력 변화 특성

영역에 걸쳐 1.2~2.0 사이에서 형성됨을 알 수가 있다. 한편, Fig. 5에서 열량이 25,000kcal/h 일 때, 각 공기 과잉비 변화에 따른 가스 공급압력이 저하되었

을 때의 특성을 살펴 보면, 본 연구에서 설정한 목표(50mmAq 까지 화염이 소멸되지 않을 것)를 달성하기 위해서는 운전조건이 적어도 25,000kcal/h 에서는 공기 과잉비가 1.6 을 넘지 않아야 하는 것으로 나타났다.

따라서, 이러한 특성을 감안할 때 목표 운전조건은 최대 목표 열량 25,000 kcal/h 에서는 공기 과잉비를 1.5 로 설정하고, 최소 목표 열량 18,000 kcal/h 에서는 공기 과잉비를 안정 연소 폭의 중간 지점인 1.6 으로 설정하여, Fig. 4 의 연소 특성도 상에서 최대 목표열량과 최소 목표 열량의 설정된 과잉 공기비 2 점을 잇는 직선을 따라서 열량 및 공기 공기비가 선형적으로 움직이도록 운전 조건식을 설정하였으며, 그 운전 조건식은 다음과 같다.

$$H = -1.25(10^{-5})\mu + 1.825 \quad (1)$$

여기서, H는 열량(kcal/h)이며,  $\mu$  는 과잉 공기비를 나타낸다.

### 3.2 목표 연소용 공기량 특성식 도출

Fig. 6 은 식(1)에 따른 각 열량별 필요 연소용 공기량을 연소 팬의 회전수에 대하여 나타낸 것이다. 연소용 공기량을 목표 운전조건에 맞게 제어한다는 것은 결국 연소용 팬의 회전수를 목표 운전 조건에 맞게 제어한다는 것과 같다. 따라서 각 열량별로 열량을 일정하게 유지한 상태 즉, 연소 시스템의 연소용 팬에 걸리는 열 부하를 일정하게 해 놓은 상태에서 회전수를 변화 시켜 가면서 연소용 공기량을 측정 후 각각의 열량에 해당되는 목표 공기량의 연소 팬 회전수 데이터를 Sort 하여 회귀 분석법으로 정리하면, 목표 연소용

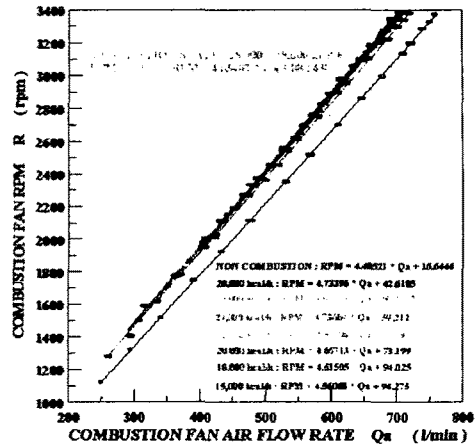


Fig. 6 연소팬의 회전수 변화에 따른 연소용 공기량 특성

공기량에 대한 연소용 팬 회전수의 선형적 관계식을 다음과 같이 도출할 수 있게 된다.

$$RPM = 4,65402Q_a + 88.5438 \quad (2)$$

여기서, RPM 은 연소용 팬 회전수이며,  $Q_a$ 는 연소용 공기량(l/min)을 나타낸다.

### 3.3 연소 팬 모터 제어

Fig. 7 은 연소용 모터를 제어하기 위한 PD 제어 시스템을 나타내며, Fig. 8 은 연소팬 모터의 회전수와 제어 위상각과

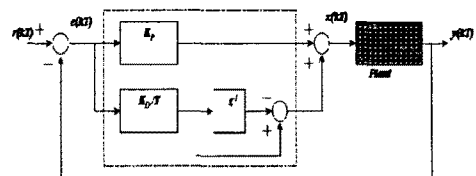


Fig. 7 디지털 PD 제어 시스템

의 관계를 나타낸다. 연소 팬이 목표로 한 연소용 공기를 연소 시스템에 정확하고 신속하게 공급하기 위해서는 모터

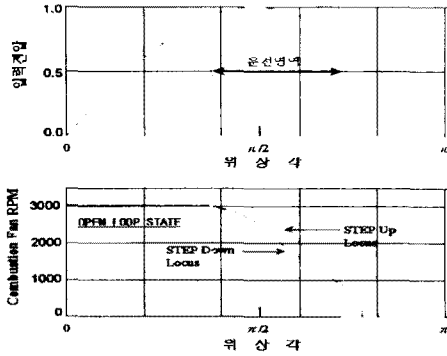


Fig. 8 모터의 회전수와 위상각의 관계

의 회전수가 정밀하게 제어 되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 마이컴 내부에서 설계가 용이하며, 오차 신호가 커지기 전에 제어할 수 있는 디지털 PD 제어를 사용하였으며, 디지털 PD 제어기의 구성요소는 Fig. 7 과 같다. 연소용 모터의 제어 위상각( $\alpha$ )을 마이컴의 카운터 값( $x$ )으로 변환하여 디지털 PD 제어기의 제어입력, 연소용 팬 모터의 회전수(RPM)를 출력, T를 샘플링 시간으로 하였다. 상수 n은 제어 위상각이 회전수에 미치는 영향을 나타내며, 실험으로 결정하였다. 마이컴 내부에서 제어기의 연산은 다음과 같이 구현하였다.

$$x(kT) = K_p \cdot (RPM_{ref} - RPM_{kT}) - K_d \cdot (RPM_{kT} - RPM_{kT-1}) \quad (3)$$

$$T = 40msec \sim 60msec,$$

$$K_p = 1/n, \quad K_d = 16/n$$

여기서,  $x(kT)$ 는 현재의 위상 입력값,  $K_p$ 는 비례이득,  $K_d$ 는 미분이득,  $RPM_{ref}$ 는 목표 회전수,  $RPM_{kT}$ 는 현재 회전수,  $RPM_{kT-1}$ 는 이전 회전수이다.

Fig.8에서, 회전수 오차를 감소시키려면 제어 가능영역에서 제어 값( $x$ )의 분해능을 높여 제어 값을 입력해야 한다. 이를 마이컴의 내부타이머를 이용하여 최대1600의 분해능을 가지도록 하여 회전수 오차를 10RPM 이내로 설계하였다.

제어기의 비례이득( $K_p$ )과 미분이득( $K_d$ )은 실험을 통하여 오버슈트율과 언더슈트율이 적은 값으로 결정하였다. 발열량에 따른 모터 회전수의 제어성능의 결과는 목표 회전수와 실제 제어되는 회전수와의 오차가 10RPM 이내로 우수하게 제어되도록 하였다.

### 3.4 가스밸브의 연료소비량 제어식 도출

Fig. 9는 과잉 공기비 변화에 따른 가스밸브의 비례제어 밸브에 입력되는 마이컴 제어값인 가스밸브 카운터( $GV_{cnt}$ )와 열량과의 관계를 나타낸다. 동일한 가스밸브 카운터 값에 대해서도 과잉 공기비 즉, 연소용 공기량에 따라서 열량이 달라지는 경향을 보이고 있다. 이는 가스밸브에 입력되는 가스 공급압력

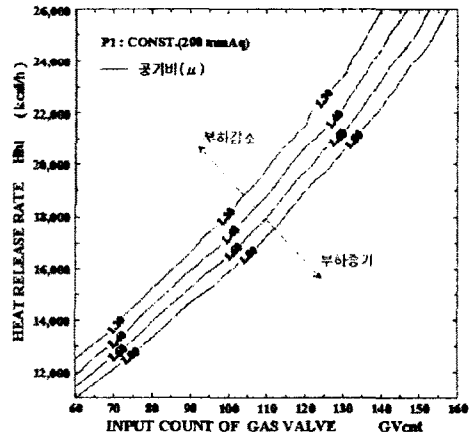


Fig. 9 공기비 변화에 따른 가스밸브 발열량 특성

이 일정한 상태에서 연소용 공기량의 증가가 버너의 가스분사 노즐에 부하로 작용하여 열량의 감소를 가져 오는 것으로 추정된다. 따라서 목표 운전조건(식(1))에 적합한 가스밸브의 제어식 도출을 위해서는 연소용 팬과 마찬가지로 Fig. 9의 특성도 상에서 운전 조건에 적합한 데이터를 Sort 하여 회귀 분석법으

로 도출하는 것이다. 그 결과를 Fig. 10에 나타내었으며, 그에 따른 도출식은 다음과 같다.

$$GV_{cnt} = 1.83165 \times 10^{-12} H^3 - 2.44513 \times 10^{-7} H^2 + 0.0128286H - 53.8977 \quad (4)$$

여기서,  $GV_{cnt}$ 는 가스밸브의 마이컴 제어 값이며,  $H$ 는 열량(kcal/h)을 나타낸다.

### 3.5 공연비 제어식 도출

공연비 제어식은 식(1)에 의한 목표 가변 열량을 기준으로 하여 각 열량에 해당하는 식(2)에 의한 연소용 팬 회전수의 마이컴 제어 값( $RPM_{cnt}$ )과 식(4)에 의한 가스밸브의 마이컴 제어 값( $GV_{cnt}$ )으로 나열하여 회귀분석을 통하여 연소용 팬의 회전수에 대한 가스소비량의 관계를 도출하였고, 그 관계식은 다음과 같다.

$$GV_{cnt} = 1.83(10^{-12}) * RPM_{cnt}^3 - 2.45(10^{-7}) * RPM_{cnt}^2 + 0.013 * RPM_{cnt} - 53.9 \quad (5)$$

여기서,  $GV_{cnt}$ 는 가스밸브 카운터이며,  $RPM_{cnt}$ 는 연소팬 회전수 카운터이다.

그런데 여기서 식(5)는 메모리 용량 등을 비롯한 여러 가지 제약조건으로

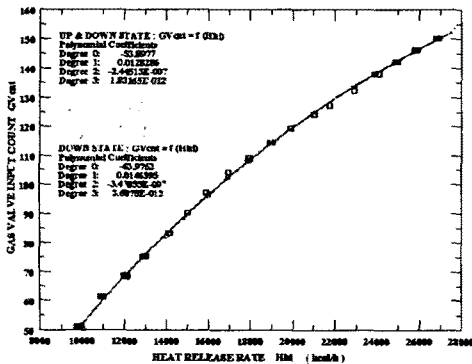


Fig. 10 운전 발열량과 가스밸브 카운트 ( $GV_{cnt}$ )와의 관계

인하여 일반적인 가전기기 제어용 마이컴에서는 구동할 수 없는 수식이다. 따라서 식(5)의 특성을 마이컴이 구현할 수 있도록 하기 위해서는 식(5)의 그래프 형태를 나타냄과 동시에 마이컴이 계산할 수 있는 수식을 인위적으로 만들어야 한다. 따라서 그렇게 만들어진 수식을 다음에 나타내었으며, 식(5) 및 식(6)에 대한 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

$$GV_{cnt} = 143 - (RPM_{cnt} - 1664) * 1664 * 4 / (44 * RPM_{cnt}) \quad (6)$$

여기서,  $GV_{cnt}$ 는 가스밸브의 마이컴 제어 값이며,  $RPM_{cnt}$ 는 연소용 팬 회전수에 대한 마이컴의 제어 값이다.

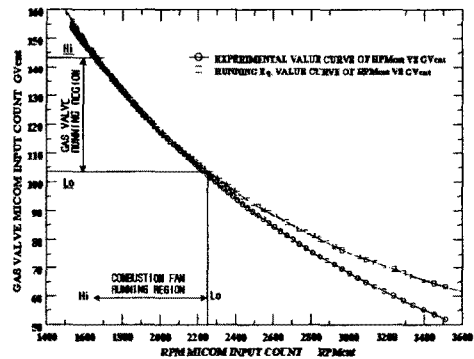


Fig. 11 공연비 제어식 그래프

식(6)의 도출은 식(5)의 curve 형태가  $f = \frac{a}{b x}$ , ( $a, b = const.$ )의 수식 curve와 비슷하다는 데에 착안하여 도출하였으며, 그 원리는 최대 열량을 낼 수 있는 목표 가스밸브 카운터 값( $GV_{cnt}$ )을 고정시켜 놓고  $\frac{a}{b x}$ 의 값으로  $x$ 가면서 열량을 감소시킴과 동시에 열량 가변 구간 내에서 식(5)의 curve 기울기와 식(6)의 curve 기울기가 동일해 지도록 상수  $a, b$ 의 값을 조정하여 식(5)를 구현하였다.



### 3.6 공연비 제어식 검증

Fig. 12는 마이컴에 식(6)을 입력하여 공연비 제어 시스템이 장착된 실제 가스 온풍 난방기에서 동작을 하였을 때, 열량 및 열효율을 나타내고 있으며, 그 결과 실제로 운전조건 설정시 목표로 한 열량과 열효율이 1.5%의 오차 범위 내에 들어와 아주 우수한 공연비 제어 성능을 나타내고 있으며, Fig. 13에서의 연소 팬 회전수에 대한 연소용 공기량 특성도 목표 공기량과 거의 동일함을 보이고 있다.

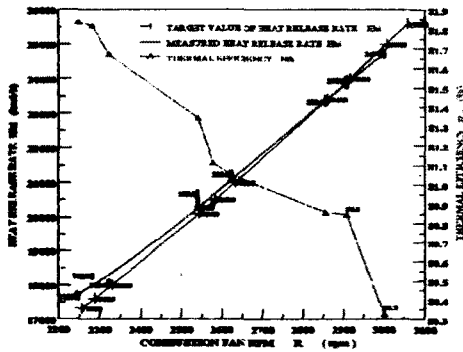


Fig. 12 발열량 및 열효율에 대한 공연비 제어식 검증

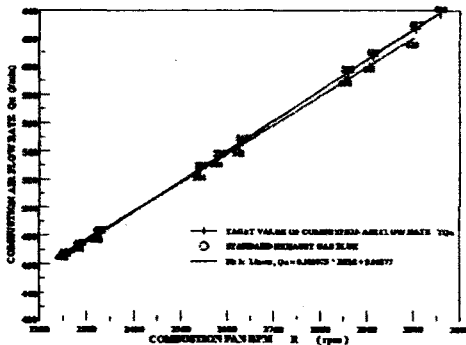


Fig. 13 연소용 공기량에 대한 공연비 제어식 검증 그래프

## 4. 결론

본 연구는 연속 열량 가변을 위한 공연비 제어에 관한 것으로

1. 버너의 연소성능에 관계되는 주요인자를 동시에 분석하여 가장 안정된 연소영역의 중간 지점에 버너 운전조건을 설정하여 공연비 제어를 구현 함으로서 버너 운전 신뢰성을 향상시킬 수 있었다.
2. 구조가 간단한 저가의 회전수 검출 센서를 이용하여 PD 제어를 행하였음에도 불구하고, 우수한 회전수 제어 성능을 확보할 수 있었다.
3. 항상 연소용 팬의 회전수 즉, 연소용 공기에 따라서 연료 소비량이 결정되도록 제어식을 구성하여 운전하도록 함으로서 실내 온도 변화에 따른 열량 가변 과정에서 발생할 수 있는 공연비 불균형을 방지함은 물론 실내 온도변화에 신속하게 대응할 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Kim, I.K., "Gun Type Burner의 보염기 형상에 따른 화염구조 특성에 관한 연구", 부산대학교, 석사학위논문, 1997
- (2) Kim, I.K., Youn, W.H., Ha, M.H., Kim, Y.H., "Gun Type 가스버너의 유동 및 연소특성 연구", 98 춘계기계학회 초록집, pp.284-289, 1998
- (3) Youn, W.H., "가스스웰 버너의 유동 및 연소특성에 관한 수치적 연구", 부산대학교, 석사학위논문, 1999
- (4) 한국공업규격 (KS), 가정용 가스 연소기기의 시험방법, KS B 8101-1998
- (5) Chigier, N., Energy Combustion and Environment, McGRAW-HILL, Inc., NEW YORK, 1981

(6) Lewis von Elbe, Combustion, Flames and Explosions of Gases, 3<sup>rd</sup> Ed. Academic Press, Inc., 1987