

---

# 연소제어시스템과 열효율 향상 방안에 관한 연구

장용남\* · 박수홍\*

A study on the Combustion Control System and Thermal Efficiency

Yong-nam Zhang\* · Soo-hong Park\*

## 요 약

본 연구에서 울산 현대중공업 및 사천 유니슨에 설치사용 중인 공업용로의 연소문제 및 시스템을 분석하고 열효율 개선방안을 제시하여 연료절감 및 생산성 향상에 도움이 되고자 한다. 단조산업에 사용 중인 공업용로는 원소재의 가열 및 재료의 특성향상을 위한 설비로 운전조건 및 연소시스템에 따라 연료의 사용량 및 재료의 특성에 지대한 영향을 줄 수 있다. 따라서 현대중공업에 설치운전 중인 100톤 가열로 및 열처리로의 연소시스템의 특성을 분석하였다.

통상적으로 각 가열장치에 설치된 버너(Burner)는 용량에 맞는 공연비를 가지며 버너가 작동할 수 있는 Turndown ratio를 가지고 있다. 이는 각각의 공업용로 특성을 정하는 것으로서 가열성능 및 온도정밀도에 지대한 영향을 미친다. 용량이 큰 버너를 설치한 열처리로는 가열성능은 향상시킬 수 있어도 유지구간에서의 온도정밀도를 얻기 힘들다. 이에 버너의 성능을 최대한 발휘할 수 있도록 연소시스템을 개선하여 각 가열구간에 맞는 연소특성을 적용 분석한 현대중공업의 가열로 및 열처리로를 예시로 연료의 절감 및 온도정밀도를 향상시키도록 본 연구에서 방안을 제시하였다.

## ABSTRACT

In this research, the problem of combustion and its system in Hyundai Heavy Industries and Sachuan Unison will be analyzed in order to provide some methods of thermal efficiency improvement and help to make a positive influence on fuel savings and their productivity.

In forging industries, in order to improve the material properties of the industrial heating elements which are being used, depending on different operation conditions of system equipment and combustion systems, fuel consumption and material properties can get a profound influence. Thus, analyzing about combustion system characteristics of 100 tons heating furnace and heat treatment furnace which are in operation in Hyundai Heavy Industry will be done.

In usual, air-fuel ratio is proper for capacity of burner installed in each heating device, otherwise burner gets an automatic turndown ratio. It has a profound influence on heating performance and precision of temperature because it is the fixed characteristics of every industrial furnace. Even if there are some methods to improve the heating performance of a furnace installed with a large capacity burner, it is very difficult to obtain the precision of temperature in maintenance interval. Based on this, performance of burner can be drove to best by improving combustion system. Proper Combustion characteristic for each heating interval was analyzed in heating furnace in Hyundai Heavy Industry. A project plan for improving fuel savings and increasing precision of temperature was presented in this research.

## 키 워드

공업로, 연소, 제어시스템, 통신선로

---

\* 동서대학교 메카트로닉스공학과(hauck@chol.com)

\* 동서대학교 메카트로닉스공학과(shpark@dongseo.ac.kr)

접수일자 : 2010. 10. 03

심사(수정)일자 : 2010. 11. 04

게재확정일자 : 2010. 12. 10

## 1. 서론

공업로에서의 연소시스템은 연료(LNG, LPG, 경유, 중유 등)와 공기를 일정비율(공연비)로 혼합하여 연소시키는 시스템으로 재료의 사용목적에 따라 200℃ ~ 1300℃ 범위의 가열온도가 정해진다.

연소시스템의 종류는 가열장치(Burner)의 제어방법에 따라 구분되며 크게 ON-OFF control, Ratio control, Pulse on-off control의 순으로 발전되어 왔다.

본 연구에서는 현대중공업 100톤 열처리로에서 운전되고 있는 산업로의 연소시스템인 Pulse on-off control system을 분석하였다. Pulse on-off control system은 가열장치(Burner)의 출력을 고정하고 여러대의 가열장치 수량을 On-off시킴으로써 산업로의 온도를 조절한다.

이 시스템은 저온 승온속도를 향상시키기 위해 가열장치의 출력을 증가 시키면 고온에서 온도정밀도를 유지하기가 어려운 현상이 발생한다. 이러한 문제의 원인을 찾기 위해 가열시스템 및 산업로내 열유동을 분석하고자 한다.

이러한 현상은 불필요한 연료소모 및 운전시간의 증가문제를 야기 시킨다. 이에 따른 해결방안으로 가열장치(Burner)의 연소범위(Combustion ratio)내에서 각 연소구간에 맞는 연소상태를 확인하여 연소배관을 개선하고 가열장치(Burner)가 각 구간에 따라 2단으로 작동할 수 있도록 프로그램을 설정하여 저온에서의 가열성과 고온에서의 온도정밀도를 높일 수 있도록 개선 방향을 제시하고자 한다.[1],[2]

## II. 산업로 연소 및 제어 시스템의 개요

### 2.1. 산업로 연소시스템의 개요

산업로의 연소시스템은 각 설비를 Control하는 PLC와 상위 PLC를 Ethernet 통신으로 Group관리하는 Computer 부분으로 구분할 수 있으며, 실제 연소시스템을 제어하는 PLC는 연소에 직접 관여하는 가열장치(Burner)제어부와 로압, 연소공기 등을 설정하는 보조장치 제어부 로 구분될 수 있다.

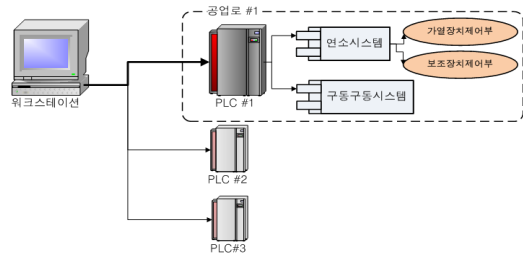


그림 1. 산업로 시스템 개념도  
Fig. 1 Property Diagram of Furnace System

Ratio control system은 목표온도에 근접할수록 가열장치의 출력이 감소하여 실제 온도의 정도를 높이기 위해서는 Circulation fan등과 같은 별도의 교반장치가 요구된다. 하지만, Circulation fan과 같은 별도의 장치는 높은 온도(통상800℃ 이상)에서 적용하기 위해서는 많은 제약이 따른다. 즉, 높은 온도에서 일정한 열원을 공급하는 기능은 우수하지만 목표온도 근처에서 공급되는 열원 및 교반능력이 줄어들면서 자체적으로 분위기의 정도를 높이기에는 문제가 있다.

### 2.2. 원인분석

기본적으로 적은 용량의 Burner를 많이 설치하면 이러한 문제가 개선될 수 있지만 단조공장에 설치된 많은 가열로 및 열처리로의 가열소재는 크기에 비해 중량이 큰 것이 특징이다. 따라서 이러한 소재를 가열하는 장치역시 크기에 제한을 가질 수밖에 없으므로 Burner의 수량을 늘리는 것은 한계가 있다. 이러한 이유로 이미 기술한 문제들이 발생하고 근본적인 원인을 크게 다음과 같이 분석하였다. 높은 열량의 Burner 설치로 인하여

- 1) 적은 열량을 요구하는 고온 유지구간
- 2) Burner의 빈번한 On-off
- 3) 연소 장치의 고장으로 실화(Miss fire)
- 4) 관내 이상 압력 발생.하였다.

공업로에서의 Heating Pattern 분석은 다음과 같다. 아래 그림은 일반적인 가열로의 승온곡선으로 통상 750~1250℃에서 100% 출력이 필요하다.

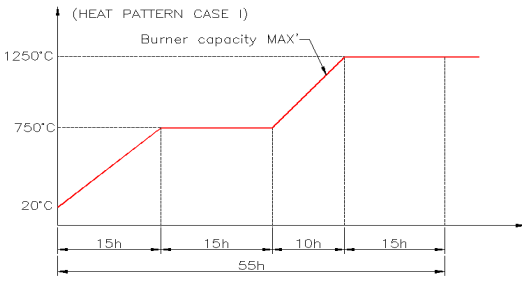


그림 2. 공업용 가열로의 가열 패턴  
Fig. 2 Heating Pattern of Heating furnace

다음 그림은 출력과 Burner 수량과의 관계를 나타내는 것으로 20대의 Burner를 가지는 100톤 열처리로의 경우 유지할 경우에는 필요한 Burner의 수량은 5대 이하이다.

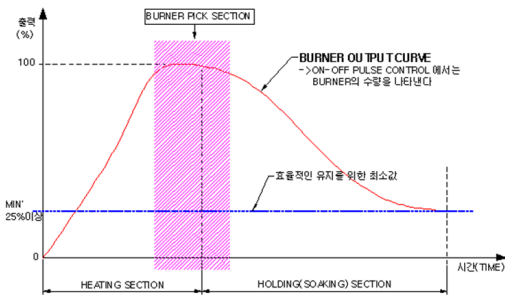


그림 3. 공업로 출력과 Burner수량의 관계 그래프  
Fig. 3 Relationship of Furnace Output and Burner

### III. 제어시스템의 적용 및 분석

#### 3.1. 제어알고리즘

공업로내에서의 소재가열을 위해서 가열제어를 실시하여야 하는데 현장에서 가장 많이 사용되는 제어알고리즘인 비례미분적분제어를 시스템에 적용하였다.

PID control에서의 각각의 조작량과 기본개념은 다음 그림과 같다. [5],[6]

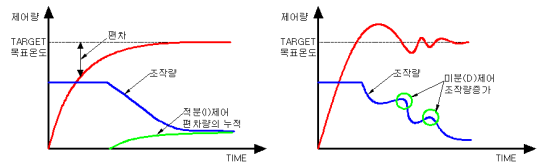


그림 4. PID 제어특성  
Fig. 4 PID Control Property

#### 3.2. 열유동해석 알고리즘

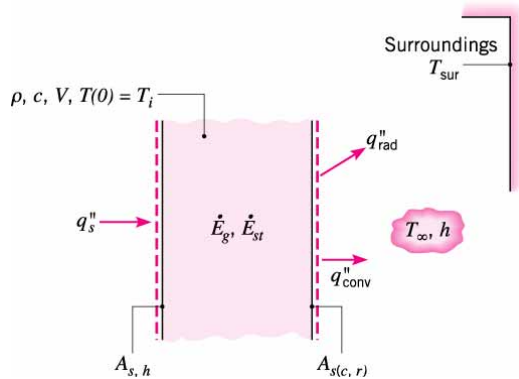


그림 5. 일반적인 소재가열에 관한 검사체적  
Fig. 5 Control Volume for Material Heating

공업로에서의 투입되는 소재가열해석을 위해서 상기 그림과 같은 공업로내의 검사체적으로 정하고 아래와 같은 에너지보존식을 이용하여 유동해석을 실시하였다.

어떠한 순간 t에 에너지 보존식을 적용하여 아래의 식을 얻을 수 있다. [1]

$$q_s'' A_{s,h} + E_g + (q_{conv}'' + q_{rad}'') A_{s(c,r)} = \rho V c \frac{dT}{dt}$$

여기서,  $q_s'' A_{s,h}$  : 외부 분위기 온도차에 따라 공급되는 열량.

$E_g$  : 소재의 내부에너지.

$(q_{conv}'' + q_{rad}'') A_{s(c,r)}$  : 소재에 공급되는 대류-복사 열전달.

$\rho V c \frac{dT}{dt}$  : 시간에 따른 소재 흡열량.

따라서, Step on-off pulse control을 하면 Burner의 가동시간이 많아져 고온유지 구간에서 대류-복사 열전달량이 증가한다.

### 3.3 공업로내의 구간별 제어알고리즘

기본적인 PID제어를 적용하기 위하여 공업로내의 전체 공간을 몇 개의 작은 공간으로 나누고 그 공간에 투입되는 버너를 각각 작은 구간별로 제어를 수행하였다

구간별 제어를 실시하는 기본적인 순서와 개념은 다음과 같다..

- 1) T.I.C의 MV값을 읽어 와서 일정변수(or상수)값과 비교하여 그 이하이면 Pilot를 일정간격으로 On-off Pulse시키고 그 이상이면 Main burner를 ON-off시킨다. 단 1Zone, 2zone, 3zone의 MV값을 비교하여 (또는 상수 cf.50%이하) 1개라도 큰 편차가 발생 시 Main burner의 On-off pulse 운전을 하지 않는다.
- 2) Pilot burner는 Zone 구분 없이 1zone on-off pulse
- 3) Main burner는 Zone 구분을 가지고 on-off pulse
- 4) Zone의 개념이 도입되지만 전체적인 버너들은 일정한 리듬이나 규칙이 있어야 한다.  
->상호간 간섭을 염두에 두어야 한다.
- 5) On/off pulse작동에 대한 검토 - 서로 대칭되면서 효율적인 연소가 이루어질 수 있도록 할 것. 버너 수량에 따른 Pulse timing설정한다,
- 6) 기존 연소하고 있는 버너에서 거리가 먼 버너부터 연소-> 각 버너를 행렬(array)개념으로 배치한다.

상기의 방법을 적용하는 전체 개념도는 아래와 같다. [3],[4]

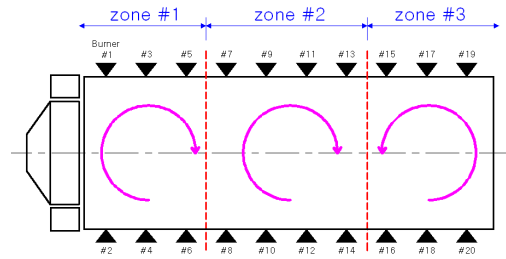


그림 6. Burner 및 Zone구성과 운전 방법  
Fig. 6 Organization of Burner and Zone

### 3.4. System의 적용효과 분석

100ton/ch 열처리로 운전Test 결과 열처리로 승온 그래프와 연료절감은 다음 그림과 같다.

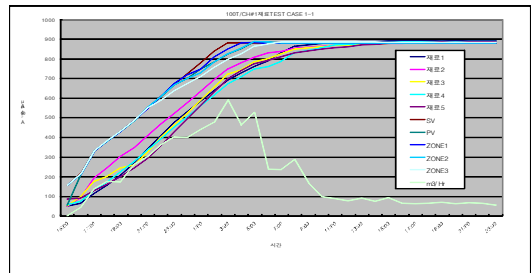


그림 7. 100톤 열처리로 승온 그래프  
Fig. 7 Temperature graph of 100ton Heating Furnace

상기의 승온그래프를 분석해보면

- 1) 재료1~6 : 그림과 같이 소재상면에 설치한 sensor-. SV : Setting value (목표온도값). PV : Present value (측정값). Zone 1~3 : 각 Zone별 온도-. m<sup>3</sup>/hr : 시간당 연료(Gas) 사용량
- 2) 고온 유지 시 평균가스 사용량이 80m<sup>3</sup>/hr 개선 전 열처리로의 평균 가스사용량인 100m<sup>3</sup>/hr 보다 약 20%의 절감율을 보이고 있다.
- 3) 매번 가열할 때 마다 소재의 상태(온도,중량,체적)등이 상이하여 정확한 data로 볼 수 없지만 적재중량(100ton) 대비 최소 10%의 연료를 절감할 수 있을 것으로 사료된다.

시간에 따른 temperature uniformity는

- 1) 승온 중 열처리로 천정에 설치된 Thermocouple을 통한 내부온도를 측정된 것으로

최소값과 최대값의 차이를 편차라 하고 이를 Temperature uniformity라고 한다.

- 2) 개선 전 고온 유지구간에서 Max  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 의 편차를 가졌으나 Test결과 고온유지구간에서 Max  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 의 편차를 나타내고 있다. 소재의 상태(온도, 체적, 중량)에 따라 다소 차이가 있지만 정성적으로 분명히 줄일 수 있음을 알 수 있다.

### 3.5 열유동해석 결과

열유동 해석을 한 결과, 소재의 가열에 영향을 주는 주요 요인을 확인하기 위해 열유동 해석. 실제적인 가열 환경을 설정 할 수 없어 정확한 Data를 얻을 수 없었지만 공업로 내부의 열유동과 소재의 가열에 영향을 미치는 인자를 파악할 수 있었다.

아래의 인자들이 클수록 소재의 가열속도는 향상되었다.

- 대류열전달 : Burner의 유속이 빠를수록
- 복사열전달 : 벽체온도가 높을수록
- 화염복사:분위기온도 (Burner의 화염온도)

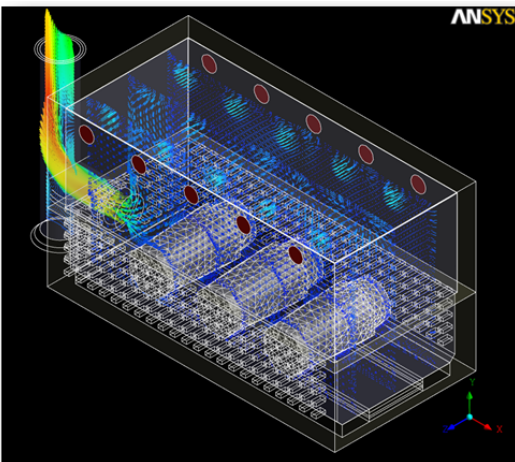


그림 8. 공업로 내 열유동해석  
Fig. 8 Heating Flow Analysis of Furnace

## IV. 결론

Step on-off pulse control system의 적용은 연료절감 및 온도정도(Temperature uniformity)를 향상시키

는 것을 확인할 수 있었다. 기구학적으로 정확하게 몇%의 연료절감이 있다고는 각 연소상황이 상이하여 정확하게 표현할 수 없지만, 최소 확인 가능한 것은 Burner실화로 인한 연료 낭비감소 및 연소부품의 내구성 증대로 인한 효과는 충분히 기대할 수 있다. 특히 온도정도의 향상은 유지구간에서의 승온 속도를 증가시키고 승온 시간을 단축시켜 생산성을 증가시킬 수 있다.

하지만 Test 중 총 Burner의 수량이 적은 50ton/ch 공업로의 경우는 상황에 따라 2zone의 MV값이 1zone, 3zone의 값의 절반이 되는 등 주변 Zone에 영향을 받고, 국부가열 현상이 발생하였다. 또한, Burner의 연소시간과 Burner수량과의 상관관계를 확인 고려해 볼 때 Burner가 20대인 100ton/ch 열처리로의 경우 1pulse당 적정 연소시간은 15초이고 Burner가 12대인 50ton/ch인 경우 1pulse당 20초 이상으로 Burner의 수량이 적을수록 Burner의 연소시간이 길어진다. 이는 고온유지 시 온도정도에도 영향을 준다.

이번 연구결과는 기존 장비를 개선하는 것으로 2단으로 제어하는 것을 기준으로 하였지만 추후 신규 공업로 설계 시 3단, 4단 등 Burner의 공연비, 수량 및 사용 환경에 따라 그 내용을 변경하여 성능향상을 기대할 수 있고, 특히 Burner의 수량이 적은 소형로의 경우는 공연비(Air/Gas ratio)가 허용하는 범위에서 많은 Step을 가지는 것이 가열성능 향상 및 온도정도 향상에 도움이 될 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 논문은 지식경제부 동남경제권(www.dlio.leading.or.kr) 기술개발사업인 2009년~2011년도 “차세대 소형선박용 디지털 레이더 시스템 개발” 사업 주관기관인 (주)신동디지텍의 지원으로 일부 이루어졌습니다.

## 참고 문헌

- [1] Frank P.Incropera David P.Dewitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", Kyobopress, P244~300, Fourth edition
- [2] North American Mfg. Technical handbook.

- [3] Korea KOSO Co., [www.kosokor.co.kr](http://www.kosokor.co.kr)
- [4] kengin Engineering, [www.kiabc.com](http://www.kiabc.com)
- [5] 김영권, 공업로 제어시스템에 관한 연구, 동서대학교 대학원 석사학위논문, 2009.
- [6] 노동순, 연소시스템 고성능 지능화 기술개발, 기술보고서, 한국원자력연구원, 2005.

## 저자 소개



### 장용남(Yong-nam Zhang)

1996년 2월 해양대학교 기계공학과 (공학사)

2011년 2월 동서대학교 대학원 메카트로닉스공학과 (공학석사)

(주) 대교엔지니어링 기술부 차장

※ 관심분야 : 해양통신시스템, 제어자동화



### 박수홍(Soo-hong Park)

1986년 2월 부산대학교 정밀기계공학과 졸업 (공학사)

1989년 2월 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사)

1993년 2월 부산대학교 기계공학과 졸업(공학박사)

1996~현재, 동서대학교 메카트로닉스공학과 교수

1995~1996, 중국, 북경항공대학교 방문교수(한국 과학재단 과학자 교환프로그램)

2002~2003, 미국, 오레곤주립대학교 방문교수

※ 관심분야 : 제어 자동화, 로봇공학