

## 도염식 가스가마의 설계 I. 설계

이기강·김 환·임응극

서울공대 무기재료공학과

(1986년 7월 31일 접수)

### Design of Down Draft Kiln for Gas Firing—I. Design

Ki - Gang Lee, Hwan Kim and Eung - Keuk Lim

Dept. of Inorg. Mater. Eng. S. N. U.

(Received July 31, 1986 )

#### ABSTRACT

This work is concerned with the experimental and theoretical investigation of a kiln with the aim to obtain the best conditions of firing in a kiln. The 0.3m<sup>3</sup> down draft kiln for gas firing was designed and constructed. Temperature distributions in kiln, combustion gas temperature, primary and secondary air flow were measured in the kiln burnt with propane LP gas. And the temperature distributions of kiln surface were measured by the thermo camera.

#### I. 서 론

요업용 가마의 설계 및 제반특성에 관한 연구는 오랫동안 중요한 과제였다. 또 1970 년대에 들어와서는 전세계적인 에너지 위기로 인하여 가마의 효율을 높이는 것은 더욱 큰 문제이었다.

특히 연료의 선택과 교환으로 생기는 가마구조 변경, 효율적인 화염을 위한 버너개선, 가마의 수율 및 열효율 증진 등의 문제가 대두되었다.

가마의 설계에 대한 연구는 Trinks<sup>1)</sup>가 처음으로 1920 년대에 제가마의 설계에 대하여 그동안의 연구를 정리하였다. 이 연구에서는 주로 실험치와 경험치들을 기준으로 하였으나 그후 열전달 이론의 발전으로 점차 열전달 중에서 복사가 가장 큰 역할을 한다는 것이 규명되면서<sup>2),3)</sup> 복사에 의한 기하학적인 구조에 대하여 연구하여 가마설계를 하여왔다.

그러나 이러한 설계식들도 매우 복잡한 미분방정식

들이며 또한 측정기구의 비비로 실제 가마설계에는 큰 도움이 되지 못하였다. 1970 년대에 들어와 고성능 computer가 개발되고, 또 측정기구의 발달로<sup>4)</sup> 각 가마들에 대하여 모델을 세워 수치해석을 하였다. Khalil<sup>5)</sup>, Hutchinson<sup>6)</sup>, Spalding<sup>7)</sup>, Patankar<sup>8)</sup> 등은 각기 복사를 주 열전달원으로 생각하고 flux method를 이용하여 가마의 제원 및 가스흐름, 온도분포, 열효율 등에 대하여 수치적인 해석을 하였다.

그러나 이러한 연구들도 아직까지는 실지 가마에서 잘 적용되지 못하고 있는 실정이다. 이는 연소기구가 규명이 안되어 있으며<sup>9)</sup> 그외에 부력, swirl, 입자들의 영향때문에 특히 가마내의 온도분포가 잘 일치하지 않고 있다.

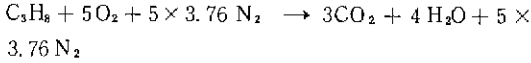
본 실험에서는 종래의 문헌과 기존의 도염식 가스가마를 토대로 하여 0.3 m<sup>3</sup> 가마의 설계모델을 설정하였고 이에따라 가마를 축조하였다. 축조된 가마의 특성을 측정하여 최적조건을 고찰하였다.

II. 설계기준

II - 1. 연소가스 온도

사용연료는 고체나 액체연료에 비해 수율 및 열효율이 좋고, 발열량이 크며, 소요 공기량이 적어 자연통풍이 가능한 프로판가스로 하였다.

프로판 가스는 다음의 화학식과 같이 반응한다.



윗식에서 이론공기량은 23.8 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>이고, 연소가스량은 25.8 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>이다. 또 프로판가스의 저 발열량은 22,350 kcal/Nm<sup>3</sup> 이다 이 프로판가스를 최대유량 1.15 m<sup>3</sup>/hr 로 하였을때 가마내의 연소가스 온도는 열수지식에 의해 다음과 같다.

우선 도염식 가마의 열수지는 요업공학 handbook 에 의하면 축열손실을 제외한 전열량과 가마벽손실이 전 열의 약 40% 정도가 된다. 따라서 연료 발열량 - {전 열량} + {가마벽손실} = 배기가스 현열이라는 열수지식에서 프로판가스, 유량이 1.15 m<sup>3</sup>/hr 이고, 공기비가 1.15 일때, 22,350 kcal/Nm<sup>3</sup> × 1.15 Nm<sup>3</sup>/hr - (10,280 kcal/hr) = t<sub>g</sub> × 29.4 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> × 1.15 Nm<sup>3</sup>/hr × 0.33 kcal/Nm<sup>3</sup>·°C. 에서 t<sub>g</sub> 즉 연소가스온도는 약 1,380 °C 가 된다.

II - 2. 가마의 크기

가마내의 전열기구가 주로 복사에 의해 이루어지므로 연소가스의 유효두께가 커지도록 矢木<sup>9)</sup> 에 의해 가마의 제원을 1 : 1 : l 로 하였다. 본 실험의 가마는 0.3 m<sup>3</sup> 의 가마이므로 한변의 길이는 약 670 m/n 가 된다.

II - 3. 천장 arch 의 곡률

천장 arch 곡률은 천장의 무게에 의한 수평력을 측벽이 견디어 주어야 하므로<sup>10)</sup> 다음과 같은 식이 성립한다. (Fig. 1)

$$f/b = (\frac{1}{2}) \tan(\alpha/4)$$

$$r = f/2 + b^2/8f$$

$$H = (G/2) \cot(\alpha/2)$$

여기서 H는 수평력, G는 천장의 무게

그림 1에서 cot(α/2) = (r - f) / (b/2) 이므로, r = b 일때

$$H = G(1 - f/b)$$

가 얻어진다. 그러므로 H는 G 및 f/b에 의해 결정된다.

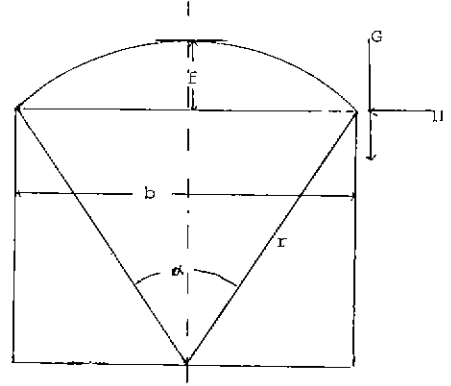


Fig. 1. Cross section of kiln.

f/b가 작으면 H는 커져서 불안정하게 되므로, 일반적으로 f/b는 1/5 ~ 1/10 사이에서 안정된 설계를 할 수 있으므로, 본 실험에서는 11/70로 하였다.

II - 4. 가마벽의 재질과 두께

2차원 정상상태에서 가마벽의 온도구배는 유한차분법(Finite Differential Method)을 이용하여 Fourie 식을 해석함으로써<sup>11, 12)</sup> 구할 수 있다.

가마벽의 임의의 한점을 (m, n) 이라하면 주위의 4점의 의한 에너지 평형은 다음과 같다.

$$T_{m+1, n} + T_{m-1, n} + T_{m, n+1} + T_{m, n-1} - 4T_{m, n} = 0 \quad (1)$$

$$T_{m, n} \left( \frac{h \cdot \Delta x}{k} (t - 2) - \frac{h \cdot \Delta x}{k} T_{\infty} - \frac{1}{2} (2 T_{m-1, n} + T_{m, n+1} + T_{m, n-1}) \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서 k는 열전도도, h는 대류상수<sup>13)</sup>, Δx는 유한차분, T<sub>∞</sub>는 실온이다.

(1), (2)식을 가지고 설계하고자 하는 가마의 벽두께와 외표면온도를 구해보자.

모델가마는 열전도율이 0.25 (kcal/mh°C) 인 내화단열벽돌로, 두께 140 (m/cm)로 하고 내벽면온도를 1250°C로 할때 정상상태에서의 외표면온도를 구해보면 천장 arch는 150°C, 측벽은 190°C이다.

천장 arch가 측벽보다 온도가 낮은 이유는 같은 열량에 대한 외표면적이 넓기 때문이라 사료된다. 따라서 두 온도를 약 200°C로 맞추기 위하여 두께조정을 하여 보면 천장 arch는 약 110 (m/m), 측벽은 130 (m/m)가 된다.

II - 5. 버너의 선택

가스버너를 선택하는데 가장 주의해야 할 점은 역화

이다. 버너의 1차공기량을 줄여서 버너내부에서 연료 가스 rich 한 혼합이 이루어지도록 하여 주공기량을 공급하여 버너출구에서 완전혼합이 일어나도록 하는 부분예혼합형 버너가 안전하다. 또한 이 부분예혼합형 버너는 NO<sub>x</sub>의 생성도 억제하므로<sup>14)</sup> 이 형식의 것을 채택하기로 하였다.

II - 6. 설계모델

이상의 것들을 종합하여 0.3 m<sup>3</sup> 도염식 가스가마의 설계모델을 다음과 같이 하였다.

- ① 가마의 크기는 700 × 700 × 650 (m/m)
- ② 천정 arch의 곡률반경은 650 (m/m)
- ③ 가마벽은 내화단열벽돌을 사용하고 두께는 천장 arch가 115 (m/m), 측벽은 130 (m/m)
- ④ 연소가스 흡입구의 면적은 30 × 30 (m/m) 이고 총 26개로 총면적 23,400 (mm<sup>2</sup>)<sup>15)</sup>
- ⑤ 굴뚝의 면적은 145 × 100 (m/m)
- ⑥ 굴뚝의 높이는 2000 (m/m)
- ⑦ 버너는 부분예혼합형을 사용하고, 최대유량 6.4 l/min의 4개의 비너를 사용하고 확산염으로 하였다.
- ⑧ 2차공기는 직경 30 (m/m)의 4개의 구멍에서 밑으로 공급된다.

위의 설계모델을 토대로 가마를 축조하였으며 그 전 면도를 Fig. 2에 도시하였다.

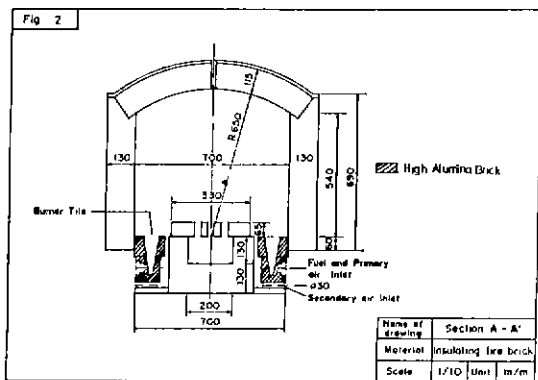


Fig. 2. Cross sectional representation of 0.3m<sup>3</sup> kiln

III. 실험방법

III - 1. 사용연료

사용한 연료는 여수에너지의 프로판 LP가스이다. 이 가스의 성분을 알기 위하여 gas chromatograph (G. C.) (Yanaco社, Model G-80)를 사용하였고, G. C.의 column은 porapak Q 80%와 carbowax 20%이었

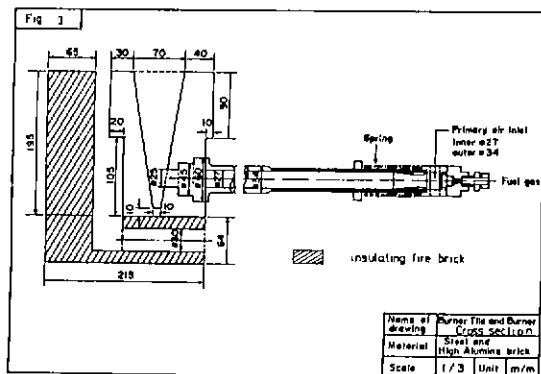


Fig. 3. Cross section of burner and burner tile.

고, 측정조건은 1μv/sec 로 하였다.

또 가스의 발열량은 Yunker's Gas Calorimeter (Tokyo Ueno社)로 측정하였다. Yunker's Gas Calorimeter는 연소된 총열이 유수에 흡수되어 이 유수의 온도차가 특정식에 의해 가스의 1Nm<sup>3</sup> 당 표준상태의 총발열량을 구하게 된다. 측정조건은 가스량 0.72 l/min, 압력 45 mm H<sub>2</sub>O, 실내온도 4°C, 수온 4°C, 습도 83.4 %이다.

III - 2. 1차 공기량 측정

II장에서 설명한 대로 버너는 부분예혼합형으로 1차공기는 가스에 의해 흡입된다. 이 흡입되는 양은 Fig. 3의 버너에 있는 흡입구의 면적에 따라 달라진다. 본 실험에서는 이 흡입구를 5등분하여 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 열어가면서 흡입되는 1차공기량을 pitot tube와 inclined manometer로 측정하였다. 또 가스는 위험하므로 압축공기로 대신하여 2.4 l/min와 4.8 l/min의 두 경우에 대하여 자기 측정하였다.

III - 3. 온도분포 및 연소가스 분석

Fig. 4에 본 실험의 전체 system을 도시하였다. 열전대는 Pt - Pt Rh 13%를 사용하였으며, A/D converter는 Doric社 400 A이다. 또 화염의 온도측정을 위한 2색온도계는 CHINO社 IR - RH 200이다.

가마승온은 프로판가스유량 19.2 l/min로 1300 °C까지 하였다. 또 과잉공기비를 1.1, 1.15, 1.2로 바꾸어 승온하였으며, 각 측정은 1300°C에서 1시간 유지시킨 후 가마 각 부위의 온도를 측정하였다.

온도측정은 가마의 우면과 측면에 열전대 출입구를 뚫고 열전대를 가마내벽에서부터 50 m/m 단위로 350 m/m까지 넣어서 그 부위의 온도를 측정하였다. 또 가마내의 위와 아래의 온도차이를 알기 위해 열전대를

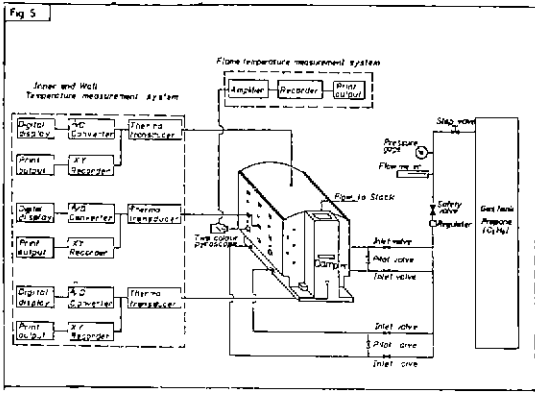


Fig. 4. Schematic diagram of experimental detecting system.

가마의 천정과 바닥에 설치하였으며, 배기가스의 현열 손실을 알기 위하여 굴뚝밑으로 열전대를 설치하였다. 또 배기가스를 적외선 분석장치(Horiba 社, COPA-1)로 채취하여 CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>의 양을 연속적으로 분석하였다.

III - 4. 가마외벽 온도분포 측정

가마외벽 온도분포는 thermo camera (Cannon 社 CT-68)로 측정하였다. thermo camera는 불체표면의 온도분포(-20°C ~ +1800°C)를 측각 관찰하고 촬영하는 적외선 영상장치이다.

기준온도원으로 액체질소를 사용하고, 주위온도의 영향을 고려할 필요가 없고 0.15°C까지 식별 가능하다. 영상부 수광면을 피사체에 맞추고 그 거리를 측정하여 초점을 맞춘다. 그 다음에 black level을 피사체의 온도분포 상태와 일치시키고 sensitivity를 그 범위내 맞게 조정한다. 그러면 브라운관에 상이 잡히게 되고 vertical position과 horizontal position을 조정하여 측정하고자 하는 부분에 spot를 맞추어 cross point의 온도를 읽어주게 된다. 그러면 이 spot의 온도와 주위의 온도분포가 표시되며 이를 카메라로 찍어 그 순간의 온도분포를 알게 된다.

IV. 결과 및 고찰

IV - 1. 사용연료

프로판 LP 가스의 G. C 분석치는 Fig.5 과 같다. 분석결과는 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> : C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> : C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>이 약 1 : 97 : 2의 비로 존재함을 알 수 있다. 따라서 이 프로판 LP 가스의 화학반응식은 다음과 같다.

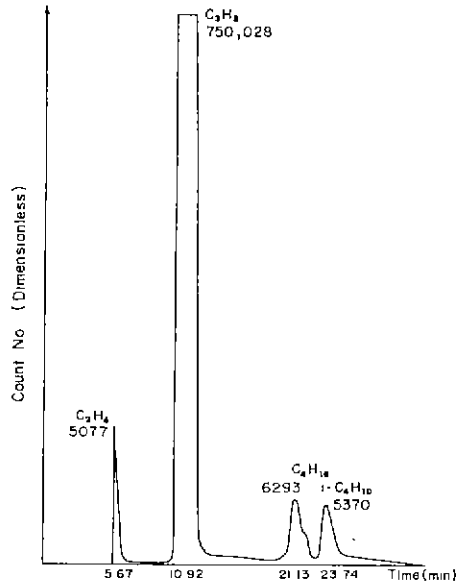
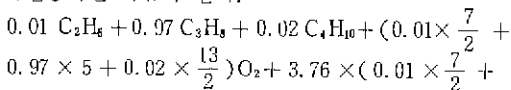
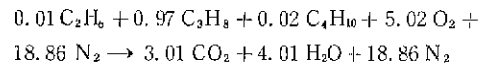
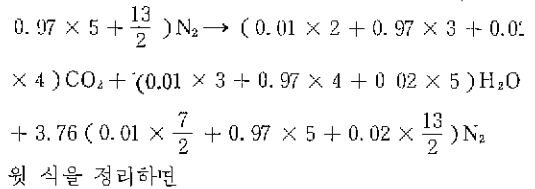


Fig. 5. G. C. analysis of propone gas .



따라서 이론공기량은 23.88 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, 연소가스량은 25.88 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>이며, (CO<sub>2</sub>)<sub>max</sub> 값은 13.8%이다.

또 Yunker's Gas Calorimeter의 측정결과는 총발열량 23,780 kcal/Nm<sup>3</sup>이고, 진발열량은 21,760 kcal/Nm<sup>3</sup>이었다. II장에서 연소가스의 온도가 1,380°C가 되기 위해서는 진발열량 22,350 kcal/Nm<sup>3</sup>이 필요한데 사용연료의 진발열량이 21,760 kcal/Nm<sup>3</sup>으로 적당하다고 생각된다.

IV - 2. 1차공기량

버너의 1차공기 흡입구 면적에 따른 1차공기량의 변화를 Table 1에 나타내었다. 1차공기는 최대 이론공기량의 80% 까지 흡입될 수 있으며 이는 2.4 l/min와 4.8 l/min의 두 경우 다 같았다. 한편 Table 1에서 흡입구가 2% 열렸을때 두 경우는 자기 1차공기가 40%와 50%로 다르게 공급되었는데 이는 유량이 매우 작아서 생긴 오차라 생각된다.

IV - 3. 가마의 승온

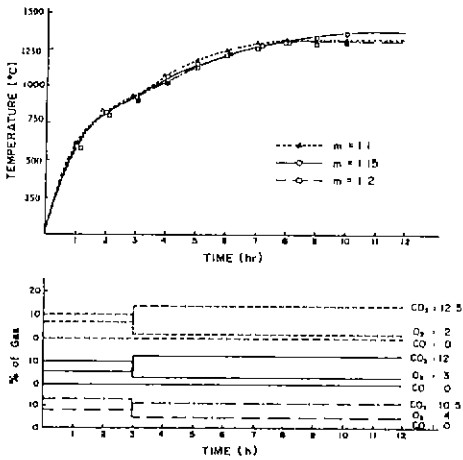


Fig. 6. Temperature rising curves and concentration diagrams of exhaust gas at  $m=1.1, 1.15$  and  $1.2$  in  $0.3\text{m}^3$  kiln.

설계 제작된 가마의 열적 용량을 알기 위하여 최고 온도를 공기비를 변화하며 구했다. Fig. 6 은 과잉 공기비 1.1, 1.15, 1.2 일때의 승온곡선이다. Fig. 6 에서  $900^\circ\text{C}$  부근에서 생기는 변곡점은 가마를 승온할 때 저온에서는 통풍력이 약하므로 서서히 가스량을 늘려가면서 승온시켜  $900^\circ\text{C}$ 에서 최대가스량  $19.2\text{ l/min}$ 로 하였을 때의 변곡점이다. 세 경우 다같은 조건으로 승온하였으며 배기가스 분석을 하여 과잉공기비가 1.1, 1.15, 1.2 가 되도록 뱀퍼로 조정하였다. Fig. 6에서 보

면 과잉공기비가 1.1 과 1.2 일때는  $1300^\circ\text{C}$  이상에서는 거의 승온하지 않았다. 한편 1.15 일때는  $1300^\circ\text{C}$  까지 빠른 속도로 승온하다가  $1300^\circ\text{C}$  이상의 온도에서는 급격한 눈화현을 보여주고 있다. 가마의 온도가  $1350^\circ\text{C}$  가 되어서는 거의 승온하지 않았으며 이때 가스유량과 공기량을 조금씩 늘리거나 줄여도 온도는 정체현상을 보이다가 떨어지게 된다. 즉 이 상태에서 가마는 거의 steady state 가 된 상태이며 이는 위열과 출열이 평형을 이루게 되어 즉 가스의 발열량과 가마벽 축열, 열관류손실, 배기가스현열손실이 평형을 이루게 되어 더 이상의 승온은 안되게 된다. 이 온도를 가마의 최고온도라 하며 가마의 열적성질을 나타내는 중요한 요소이다. 이 온도는 사용연료와 가마의 크기, 굴곡의 높이 및 내화벽돌의 종류등으로 결정되어진다. 본 실험의 경우에 사용연료는 프로판가스이며 이의 이론 화열온도는  $1650^\circ\text{C}$  등에 의해 실험치로 공기비 1.15 일 때 약  $1650^\circ\text{C}$ 이며, 또 II 장에서 열수지에 의한 가스평균온도는  $1380^\circ\text{C}$  이어서 실험결과와 일치한다고 말할 수 있다.

IV - 4. 화염의 저동과 온도분포

앞의 실험결과에서 보면 공기비가 1.15 일때가 가장 승온이 빨랐으며 또 최고온도까지 도달할 수 있었으며 1.1 일때나 1.2 일때는 1.15 에 비해 승온속도가 느렸고 또 최고온도도  $1300^\circ\text{C}$  이상에서는 거의 승온이 안되는 경향을 보였다. 일반적으로 이 도염식 단가마는 자연통풍에 의해 2차공기가 흡입되며 따라서 2차공기를 예열하지 않으므로 2차공기량이 적을수록 온도

Table 1. Flow of Primary Air with Varying the Opening of Primary Air Inlet at Room Temperature.

Flow of fuel (l/min)	Opening of primary air inlet (%)	Flow of primary air (l/min)	Primary air theoretical air	Velocity at burner outlet (m/s)	Reynolds No.
2.4	0	2.4	0	0.07	130
	20	25	0.4	0.8	1,450
	40	27.9	0.5	0.9	1,630
	60	33	0.6	1.0	1,800
	80	37.6	0.7	1.2	2,170
	100	43.3	0.8	1.3	2,350
4.8	0	4.8	0	0.14	250
	20	55.4	0.5	1.8	3,250
	40	65.2	0.55	2.0	3,620
	60	72	0.6	2.2	3,980
	80	77.6	0.7	2.4	4,340
	100	90.4	0.8	2.8	5,060

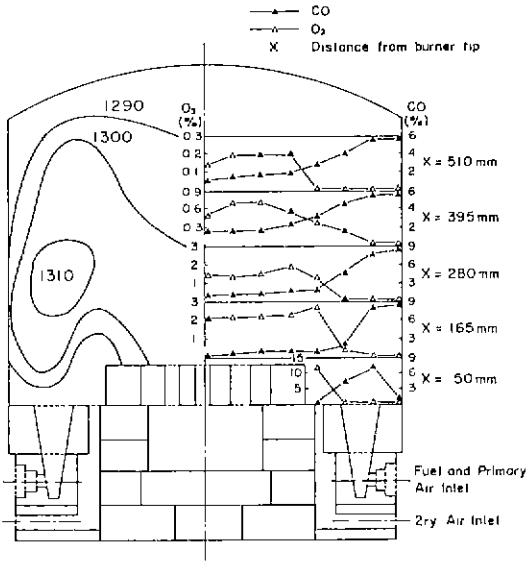


Fig. 7. Schematic representation of concentration and temperature distribution at  $m=1.1$ .

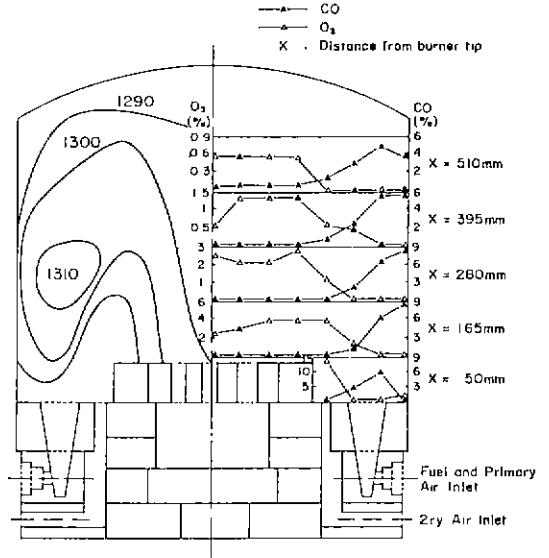


Fig. 9. Schematic representation of concentration and temperature distribution at  $m=1.2$ .

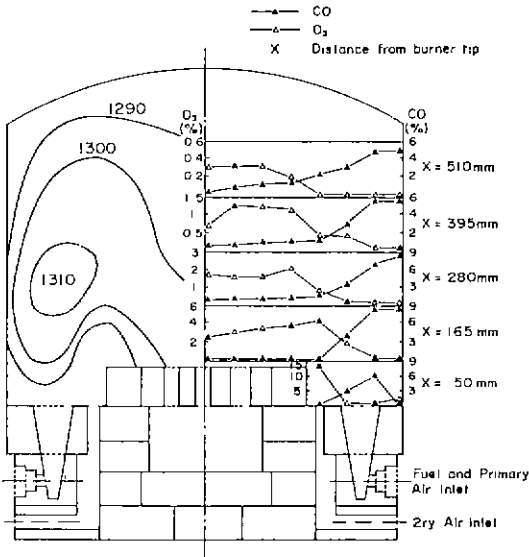


Fig. 8. Schematic representation of concentration and temperature distribution at  $m=1.15$ .

가 더 올라간다고 생각할 수 있다. 그러나 실험결과에는 이에 위배되므로 즉 공기비 1.1 일때 불완전연소가 안 일어난 상태에서는 더욱 승온이 빠르고 최고온도도 높아져야 하는 것으로 사료되므로 그 이유에 대하여 생각하여 보자.

가마내에서 승온의 가장 주된 인자는 연료의 산화반응에 생긴 화염이라 할 수 있다. 즉 화염이 가마내에 어떤 상태로 존재하느냐에 따라 가마의 열적 성질이 결정된다고 할 수 있다. 그러나 고온의 화염을 관찰하기는 쉬운 일이 아니다. 따라서 거의 대부분이 간접법을 이용하여 화염을 유추하는 방법을 택하고 있다. 본 실험에서는 적외선 기체분석장치로 고온의 연소가스를 분석하여  $CO_2$ 는 연소가스,  $CO$ 는 연료가스,  $O_2$ 는 공기를 대표한다고 생각하여  $CO$ 가스가 존재하는 부위를 연소가 진행되는 부위라 예측하였다.<sup>17)</sup>

Fig. 7~9는 본가마의 2차원 단면도에서 중심선을 기준으로 대칭면으로 보고 한쪽면은  $CO$ 와  $O_2$ 의 농도변화에 대하여 도시하고 나머지면에는 온도분포를 도시하였다.  $CO_2$ 는 가마전체에 거의 균일하게 분포되어 있으므로 생략하였다. 또  $X$ 는 버너출구에서의 거리이다. 우선 세 그림에서 모두 화염은 우측 하단에 있는 버너에서 나와 우상단과 좌상단을 거쳐 즉 천장 arch를 타고 돌아서 좌측 하단의 연소가스 흡입구로 빠져나가고 있다. 그런데  $CO$ 가스의 농도변화를 살펴보면 Fig. 7 즉 공기비 1.1 일때는  $CO$ 가스가 흡입구 바로 위( $X=165$  mm)에서 약 0.5% 정도 존재함을 알 수 있다. 또 Fig. 8 ( $m=1.15$ )에서는  $X=280$  mm에서 약 0.2% 정도 존재하고  $X=165$  mm에서는 존재하지 않았다. 그리고 Fig. 9 ( $m=1.2$ )에서는  $X=510$

mm에서 약 0.1% 정도 존재함을 알 수 있다. 따라서 화염은 공기비가 적을수록 점점 길어져서 공기비가 1.2 일때는 천장 arch 부근에서,  $m=1.1$  일때는 흡입구 바로 위까지 길어져서 불완전연소가 일어난다고 생각할 수 있다.

또  $O_2$ 의 농도분포를 보면 CO와 정반대의 경향을 보이고 있으므로 이 실험값을 신뢰할 수 있다고 말할 수 있다. 따라서 앞의 실험결과와 이 결과를 비교해보면 다음과 같이 말할 수 있다. 즉  $m=1.1$  일때는 화염이 가마전체에 존재하므로 가마안의 연소상태가 불완전연소라 할 수 있다. 또  $m=1.2$  일때는 차가운 2차공기의 영향으로 가마의 승온이 늦게 된다는 것을 알 수 있다. 따라서  $m=1.15$  일때 즉 가마안에 화염이 천정을 타고 돌아 천장 arch와 흡입구의 중간정도에 존재할 때가 연료의 완전연소와 차가운 2차공기가 적게 존재함으로써 최고온도까지 승온될 수 있다고 생각된다. 또 온도분포는 세 경우 다 비슷한 분포를 보여주고 있다. 즉 가마안의 온도구배가  $10^{\circ}C \sim 20^{\circ}C$ 로 균일한 온도분포를 보여주고 있다. 온도분포는 화염과 밀접한 관계가 있으며 화염의 외표면의 온도가 최고온도가 되므로 화염의 거동에 따라 가마안의 최고온도가 나타나게 된다. 그러나 Fig. 7~9를 보면 최고온도부위가 가마의 중심부위가 아니고 버너쪽으로 쏠려 있다. 이는 가마내의 열전달현상에 의한 것으로 사료된다. 즉 고온의 화염에서의 열전달은 주로 가스복사에 의하여 일어난다. 그리고 화염과 2차공기간의 열전달은 대류에 의해, 또 화염과 벽면간은 전도에 의하여 이루어진다. 따라서 화염으로 둘러싸인 부위는 화염 외표면 온도에 가까우므로 최고온도를 나타내게 된다.

공기비가 1.2 이상이 되면 2차공기의 차가운 영향과 혼합도 증가로 화염의 길이가 짧아짐으로써 가마내의 온도분포를 나쁘게 된다.

#### N - 5. 가마 외표면 온도분포

II장에서 유한차분법(F. D. M.)으로 2차원 정상상태의 에너지 평형에 의한 가마 외표면온도를 해석하였다. 이때의 초기조건으로 가마내벽온도를  $1250^{\circ}C$ 로 주었는데 본 실험에서  $1300^{\circ}C$ 에서 1시간 유지시킨 후 가마내벽온도를 측정하여 보니  $1250 \pm 10^{\circ}C$ 로 거의 비슷한 분포를 보았다. 또 이때의 가마외표면 온도분포는 thermo camera에 의해 측정되었다(Fig. 10)

Fig. 10에서 보면 우측에 있는 세개의 온도가 보이는데 위의 온도가 sensitivity로 온도변화폭을 나타내며 가운데 온도가 cross point 온도로서 사진에서 정가운데 온도를 나타낸다. 다음에 맨 밑에 있는 온도는 black level 온도로서 본 실험에서 설정한 온도이다.



Fig. 10. Photograph of surface temperature distribution of the kiln.

이 결과로써 외표면 온도는  $180^{\circ}C \pm 3^{\circ}C$ 의 온도분포를 갖고 있음을 알 수 있다. 이는 II장에서 설계한 온도인  $200^{\circ}C$ 와 비교적 잘 일치한다고 말할 수 있다.

#### V. 결 론

$0.3 m^3$  도염식 가스가마의 설계모델을 설정하고 이를 근거로 축조한 가마를 이용하여 진발열량  $21,760 kcal/Nm^3$ 인 프로판 LP 가스를 연료로 실험한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본가마에 사용된 부분예혼합형 버너의 1차공기량은 최대 이론공기량의 80%까지 흡인되었고, 나머지는 굴뚝의 통풍력에 의해 2차공기로 흡인된다.
2. 연소가스 평균온도는 공기비에 의해 결정되어지며 공기비가 1.1~1.2일때 화염은 천정 arch를 타고 돌아 가마의 온도분포가 균일하게 되며, 그 이상일 때는 화염이 짧아지므로 온도분포가 불량하게 된다.
3. 최고 가마온도는 공기비 1.15일때  $1350^{\circ}C$ 로 가장 빠른 승온속도를 보였다.
4. 가마외벽의 평균온도는  $180 \pm 3^{\circ}C$ 로 설계치와 비교적 잘 일치하였다.

#### REFERENCES

1. Trinks *Industrial Furnaces* John Wiley & Sons. Inc. (1925).
2. C. Hulse "Convection and Non-Luminous Gas Radiation in Furnace Heating", Sleafield Univ. Fuel Soc. J. Vol. 3, p. 32-38 (1952).
3. S.J. Genna, E.J. Nolan & A.A. Furczyk

- “Heat Transfer in a Gas-fired Furnace”, of AIME, May, p. 527-536, (1954).
4. P. Hutchinson “Looking into Combustion”, Phys. Bull. Vol. 33, p. 128-131. (1982).
  5. E.E. Khalil, etc. “The Calculation of the Flow and Heat Transfer-characteristics of Gas-fired Furnaces”, 18th Symposium on Combustion, 1927-39 (1981).
  6. P. Jutchinson, E.E. Khalil, J.H. Whitelaw, “The Calculation of Furnace-flow Properties and their Experimental Verification”, *J. Heat Transfer*, 92(2), 276-83 (1976).
  7. D.B. Spalding, Flow Mixing and Heat Transfer in Furnaces, Pergamon Press (1978).
  8. S.V. Patankar, D.B. Spalding “A Computational Model for Three-dimensional flow in Furnace”, 17th Symposium on Combustion 605-614 (1978).
  9. 朱木榮 : “공업요로” p.29 공립출판 (주), (1953) .
  10. *Op. cit.*, (9) p. 518-519.
  11. M. Neati: Ozisik “Basic Teat Transfer”, p. 128-136 McGraw-Hill (1981).
  12. J.P. Holman : “열전달” p 83-95 관림사(1983).
  13. 김 영철의 “열관리 편람” p.370 형제사(1977) .
  14. 공업요로 핸드북, p. 72 일본 공업로 협회, (1978) .
  15. 北沢孔昭 : “중유로의 설계와 연소의 실제”, 요업업과 증유 p. 57 窯業協會 .
  16. 조 경국, 황 상순 “전이화염의 최고화염온도 측정에 대한 실험적 연구”, 서울대학교 M. S. thesis, (1983) .
  17. 功力雅長 “요로” p. 8 신화학공학 강좌 Ⅲ-6 일간공업사 (1957) .