



## 초고온용 공기에열식 열교환기의 개발 및 성능 평가

# The Development and Performance Evaluation of the Air-preheating Heat Exchanger for Ultra-high Temperature Applications

박 용 환\*

Yong-Hwan Park

(1999년 10월 7일 접수, 1999년 11월 17일 채택)

### ABSTRACT

A compact air-preheating type heat exchanger was developed and tested for the ultra-high temperature heat recovery applications. For the direct use of exhaust gases up to 1200°C, the heat exchanger adopted a ceramic core with high strength and low thermal expansion coefficient less than  $1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . The ceramic core was fabricated by special extrusion and bonding techniques. To minimize thermal stresses in the core, spring-loaded sealing mechanism was designed and successfully installed. 1-pass air flow scheme was adopted for the compactness and cost-savings. The pressure test for the ceramic core showed no failure under 35 kPa and less than 3% leak under 7 kPa. Flue gas simulation system was developed to investigate the performance of the heat exchanger. The test results showed normal operations of the heat exchanger up to 1200°C of exhaust gases and relatively high heat recovery efficiencies of 31~39% depending upon exhaust gas temperatures.

### 1. 서 론

최근의 대기오염 문제 해결을 위하여 저유황 경유 및 천연가스 연료 사용에 대한 필요성이 확대되고 있는 가운데, 에너지 가격 급등으로 연료 연소 시에 발생하여 버려지는 고온의 배기

가스로부터 폐열을 최대한 회수하여 여러 가지 용도로 사용함으로써 에너지를 절감하기 위한 고효율 폐열 회수장치 개발이 큰 관심을 끌고 있다. 이러한 폐열 회수장치로는 절탄기나 공기 예열기 등이 개발되어 있으나, 이중 연소 시에 사용되는 흡입공기를 고온으로 예열하여 로 내로

\* 호서대학교 안전공학부

재투입함으로써 연소 효율을 향상시켜 에너지 절감을 꾀하고자 하는 공기예열식 열 교환기가 보다 효율적인 대책으로 파악되고 있다<sup>1,2)</sup>. 특히 알루미늄 용해로와 각종 금속 성형가공과 열처리를 위한 공업로, 그리고 내화로 등은 대부분 연료 연소 시에 800℃ 이상의 고온의 배기가스를 배출하고 있는 까닭에, 이들 고온의 폐열에 대한 회수 효율을 높이는 일은 에너지 절감뿐만 아니라 생산제품의 원가절감 측면에서도 매우 중요하다고 본다.

현재 국내에서 제작되고 있는 고온 폐열 회수형 공기예열기는 열 교환 소재가 대부분 탄소강이나 스테인레스계 소재로 되어 있어 통과 허용 배기가스의 온도가 400~700℃로 제한되기 때문에 폐열 회수효율이 20% 이하로 매우 낮은 실정이다. 일부 특수 합금을 소재로 한 열 교환기의 경우 연료 절감효율이 약 30% 정도로 높아지기는 하나, 가격이 매우 고가이며, 900℃ 이상의 고온에서는 부식과 재질 열화로 말미암아 내구수명이 급격히 짧아지는 문제점을 안고 있다. 이에 따라 900℃ 이상의 배기가스의 경우 1차 냉각이 필요하게 되어 추가로 에너지가 소요된다. 따라서 1000℃ 이상의 배기가스에도 직접 사용될 수 있는 저가의 공기 예열기의 국내 개발이 시급히 요망되고 있다.

이에 본 연구에서는 핵심 열 교환 소재를 1200℃ 까지의 배기가스에도 직접 사용할 수 있는 초고온 내열성 세라믹스로 할 경우 폐열 회수효율을 적어도 30% 이상, 최고 60%까지 크게 증가시킬 수 있는 것으로 보고<sup>3,4)</sup> 직교흐름 방식의 공기 예열식 열 교환기를 독자적인 기술로 설계, 개발하고 그 성능평가를 수행하였다. 이를 위하여 열 적, 구조적 특성이 우수한 세라믹 소재의 개발과 핵심 코아 제작을 위한 특수 성형 방법을 개발하였으며, 아울러 열 교환기의 성능을 실험실내에서 쉽게 평가할 수 있는 성능시험 장치를 별도로 개발하여 개발품의 성능시험에 사용하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 열 교환 효율

열 교환하는 유체가 고체 벽으로 격리되어 있는 격벽식 열 교환기에서의 열 교환 효율은 에너지효율(열통과 유효도) 및 온도효율로 나타내는데, 에너지효율은 실제의 교환열량과 열역학적으로 달성 가능한 최대교환열량과의 비를 나타내며, 식 (1)로 표시된다<sup>5,6)</sup>.

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{c_h G_h (T_{h1} - T_{h2})}{(cG)_{\min} (T_{h1} - T_{c1})} \\ &= \frac{c_c G_c (T_{c2} - T_{c1})}{(cG)_{\min} (T_{h1} - T_{c1})} \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

온도효율은 식 (2)와 같이 고온 측 온도효율( $\eta_h$ )과 저온 측 온도효율( $\eta_c$ )로 나뉜다.

$$\begin{aligned} \eta_h &= (T_{h1} - T_{h2}) / (T_{h1} - T_{c1}) \\ \eta_c &= (T_{c2} - T_{c1}) / (T_{h1} - T_{c1}) \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

식 (1)과 식 (2)에서,  $(cG)_{\min}$ 이 고온유체이면,  $\epsilon = \eta_h = \eta_c / R$ ,  $(cG)_{\min}$ 이 저온유체이면,  $\epsilon = \eta_c = \eta_h / R$ 의 관계가 성립된다. 단,  $R = (cG)_{\min} / (cG)_{\max}$ 이다. 공기 예열식 열 교환기의 경우 저온 유체인 공기의 최대 예열 온도가 중요하므로 열 교환 효율은 저온 측 온도효율을 평가하는 것이 바람직하다. 이 때, 교환열량 Q는 외부로의 열의 누설이 없다고 가정할 경우

$$Q = c_h G_h (T_{h1} - T_{h2}) = c_c G_c (T_{c2} - T_{c1}) \dots(3)$$

으로 표시된다.

## 3. 열 교환기 설계 및 제작

### 3.1 시스템 설계

본 열 교환기는 비교적 청정연료를 사용하는 공업로의 1200℃까지의 배기가스의 고온 폐열을 효과적으로 회수하기 위하여, 핵심 부품인 열 전달 코아를 저열팽창성의 내열, 내식성이 우수한 특수 세라믹 소재로 하였으며, 제작비용을 줄이고 설치 공간을 최대한 작게 하기 위하여 1-pass형 직교흐름 방식으로 설계하였다. 흡입공기에 대한 1-pass 방식은 3-pass 방식에 비해 폐열 회수효율은 약간 떨어지는 단점이 있으나 열 교환기 크기가 작아 좁은 공간에도 설치가 가능하고, 구조가 간단하여 제작이 용이하며 압력손실이 작아 송풍기의 용량도 작게 할 수 있

는 등의 장점이 있는 것으로 파악되었다.

본 열 교환기는 실제 배기가스와 흡입공기간의 열 교환이 일어나는 세라믹 코아, 외부로의 열 손실을 차단하기 위한 단열기구, 가스나 공기의 누출을 방지하기 위한 기밀유지기구, 그리고 이들을 감싸면서 배기가스와 공기의 흡배출구가 달려 있는 케이징 등으로 구성되어 있다. Fig. 1은 본 열 교환기 본체의 구성을 나타내는 개략도를 나타내고 있다.

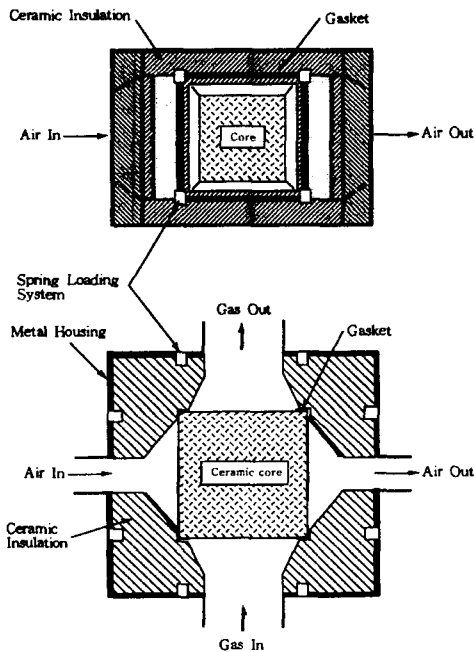


Fig. 1 Schematic diagram of the heat exchanger main body

### 3.2 세라믹 코아 설계 및 제작

직교흐름 방식의 세라믹 코아는 가스 통로와 공기 통로가 서로 수직으로 교차하는 형상을 가진다. 세라믹 코아의 셀의 형상, 개수 및 치수는 버너의 최대 열 용량 150,000 Kcal/hr(600,000 Btu/hr)를 기준으로 한 열 전달 및 압력강하 이론해석 결과와 코아 성형 및 제작기술, 기계가공기술 등을 고려하여 설계되었다. 가스통과 면에는 6mm×12mm 단면을 가진 16개의 사각통로 셀을 12층으로 배치하였으며, 공기통과 면에는 3

mm×12mm 단면을 가진 12개의 사각통로 셀을 13층으로 배치하였다. 코아 가장자리는 기밀을 위한 가스켓 사용을 위하여 두께를 약 20mm 정도로 하였으며, 이에 따라 성형 후 코아의 전체 크기는 대략 300mm×300mm×300mm 정도가 되도록 설계하였다.

코아의 소재로서는 열팽창계수가 비교적 작고, 기공율이 낮으며, 내열성이 우수하고 성형성이 좋은 MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> 성분의 MAS계 세라믹으로 하였으며, 세라믹 코아 소성 후의 주성분 및 주요 물성치는 각각 Table 1과 같다. 복잡한 형상의 코아를 만들기 위해서 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 각 통로 면에 대하여 중공 판 모양의 unit layer를 진공 압출 성형한 후 수축률을 감안하여 일정한 길이로 절단하였고, 1차 건조 소결 시킨 후 공기 통로와 가스 통로를 수직방향으로 교대로 적층, 본딩함으로써 코아를 제작하였다. 이 때, 셀 내의 코너 부분은 R2 정도의 라운드를 주어 응력 집중에 의한 크랙 발생을 억제하도록 하였다. 적층이 완료된 코아는 가스켓 접촉면에서의 누설을 방지하기 위하여 연

Table 1 Chemical composition and material properties of the ceramic core after firing

| Item                             | Property                                  |           | Others   |
|----------------------------------|---|-----------|--|
| Composition                      | SiO <sub>2</sub>                          | 50%       | TiO <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≤ 1%,<br>CaO, Na <sub>2</sub> O ≤ 0.5% |
|                                  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>            | 35%       |  |
|                                  | MgO                                       | 14%       |  |
| Crystal phase                    | Cordierite                                | ≥ 90 wt%  |  |
|                                  | Mullite                                   | ≤ 2.4 wt% |  |
|                                  | Spinel                                    | ≤ 1.2 wt% |  |
| Melting point                    | Min. 1410°C                               |           |  |
| Coefficient of thermal expansion | 0.6~0.8×10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> |           | ≤ 1.0×10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>  |
| Specific heat                    | 954.408 J/kg°C                            |           | at constant pressure   |
| Thermal conduction coefficient   | 1.2558 W/m°C                              |           |  |
| Bending strength                 | 30 N/mm <sup>2</sup>                      |           |  |
| Absorption rate                  | 20~30%                                    |           |  |
| Pore size                        | 1~9 μm                                    |           |  |
| Pore volume                      | 0.18~0.24cc/gr                            |           |  |

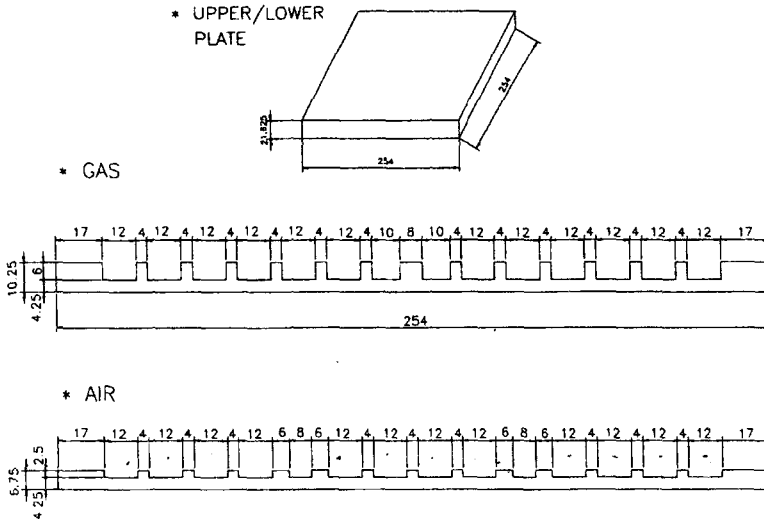


Fig. 2 Unit layers for extrusion of air and gas flow plates to fabricate the ceramic heat exchanger core

삭 가공으로 외곽 치수는 물론 가스켓부의 수직도와 편평도를 정밀하게 유지하도록 하였다. Fig. 3은 최종적으로 제작이 완료된 세라믹 코아의 모습을 나타낸 사진이다.

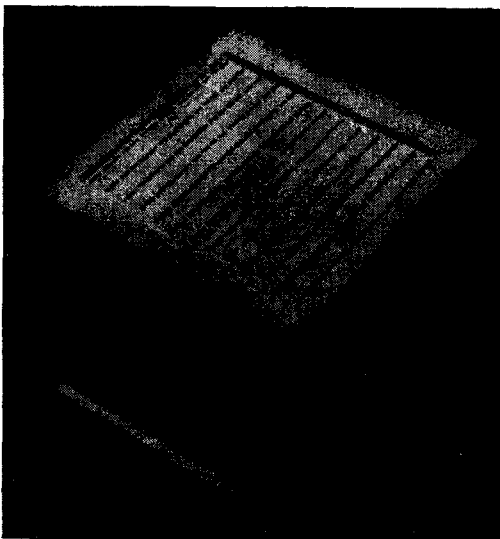


Fig. 3 A photograph of the fabricated ceramic core

### 3.3 단열기구 및 기밀

로에서 배출되는 배기가스의 온도는 최고 1200

℃로 설정하고 배기가스가 통과하는 배관 및 열교환기 내부는 외부로의 열 손실과 금속 소재의 고온열화나 부식을 최소화하기 위하여 경량 내화재 및 세라믹 보드로 단열내화처리를 하였다. 또한 예열 공기가 통과하는 배관에는 외부로의 열 손실을 최소화하기 위하여 배관 외부에 고온 단열재 마감처리를 하였다.

세라믹 코아와 단열내화재간의 접촉면에서는 가스가 누출되지 않으면서도 세라믹 코아에 무리한 힘이 가해지지 않는 범위에서 적절한 압축력에 의한 기밀이 필요하다. 그러나 열 교환기

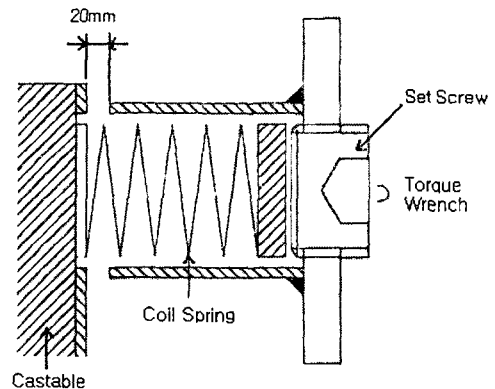


Fig. 4 Spring-loaded sealing mechanism to absorb thermal stresses

운전 시에는 큰 온도차이와 기밀 압축력에 의해 코아 내에 과도한 열 응력이 발생하게 되므로 이를 적절히 흡수할 수 있는 기구가 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 1400℃까지 사용 가능한 초고온용 세라믹제 가스켓과 함께 특수하게 고안된 Fig. 4와 같은 현가 하중 방식의 기밀유지기구를 고안하여 세라믹 코아와의 접촉면에서의 기밀력 유지 및 과도한 열 응력을 흡수할 수 있게 하였다. 본 기밀유지기구는 열 교환기 케이징 외부에서 초기 기밀력 크기 설정이 용이하므로 조립 및 보수 측면에서도 매우 편리하다.

#### 4. 성능시험

##### 4.1 세라믹 코아 성능시험

제작된 세라믹 코아가 열 교환기의 열 전달 매체로서 사용되기 위해서는 물성치나 기본적인 기계적 특성 이외에도 기밀성과 내압 성능 등 부품으로서의 성능을 만족하여야 한다. 이에 따라 제작이 완료된 세라믹 코아 시제품에 대하여 누설시험과 내압 시험을 실시하였다. 누설시험은 세라믹 코아 내의 기공 또는 균열이나 가스켓 면의 기밀 불량으로 인하여 배기가스나 흡입공기가 서로 다른 통로로 흘러 들어가는 것을 탐지하기 위한 것이며, 7kPa의 압력 하에서 24시간 경과 후 누설이 발생하여 5% 이상의 압력 강하가 발생하는 경우 불량으로 처리하였다. 내압 시험은 최대 통과 기계압력에 대하여 세라믹 코아에 균열진전이나 파손이 발생하는지의 여부를 가리기 위한 것으로 최대통과 시험압력은 35kPa로 설정하였다<sup>3)</sup>. Fig. 5는 사용된 내압 시험장치를 나타낸 것이다.

시제품으로 제작된 2개의 세라믹 코아에 대하여 먼저 기하학적 치수의 검증과 육안에 의한 크랙검사를 실시한 결과 이상이 없는 것으로 판단되었으며, 이에 따라 다시 누설시험과 내압 시험을 각각 수행하였다. 시험 결과 누설시험에서는 7kPa의 압력에 대하여 24시간이 경과한 후 약 1~3%의 누설 량을 나타내어 허용기준인 5%를 초과하지 않았으며, 내압 시험에서도 2개 모두 시험압력 35kPa 하에서 크랙발생이나 파손 등의 흔적이 전혀 발생하지 않아 모두 자체

시험기준에 부합하는 것으로 나타났다.

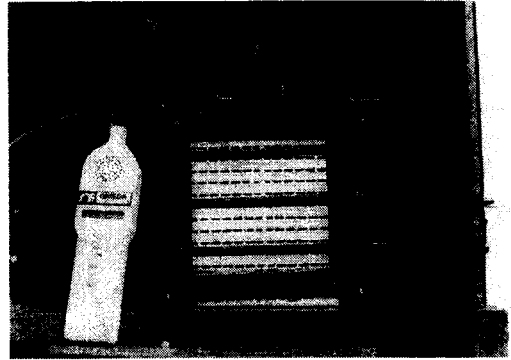


Fig. 5 Pressure test equipments for ceramic core

##### 4.2 열 교환기 성능시험

이상으로 누설 및 내압 성능시험을 통과한 세라믹 코아와, 제작된 다른 부품들을 조립하여 열 교환기 시제품을 제작 완성하였다. 본 연구에서는 열 교환기의 현장 설치시험에 앞서 시운전을 겸한 성능평가를 수행하기 위하여 별도의 성능시험장치를 구성하고 열 교환기의 설치 및 시운전 상태, 열 교환 효율 측정, 그리고 세라믹 코아의 파손 여부 등과 함께 시스템 전체의 종합적인 운전 상태를 평가하는 것으로 하였다.

Fig. 6은 본 성능시험장치의 구성도를 나타내는 것으로 본 장치는 실제로 고온의 배기가스가 발생하는 연소로, 공급되는 연료 및 흡입공기와 혼합, 점화장치인 버너, 공기 공급장치인 송풍기, 그리고 배기가스가 배출되는 연도, 그리고 배기가스 온도 및 연료 량 자동제어 방식의 제어반 등으로 구성되어 있다.

버너의 경우 예열 공기가 약 500℃까지도 올라갈 것으로 예상됨에 따라 흡입공기 온도가 약 700℃까지 가능한 예열 공기 식의 특수 버너를 사용하였다. 열 교환기는 연소로와 연도 사이에 설치되어 배기가스와 버너 흡입공기가 서로 열 교환하도록 되어 있다. Fig. 7은 열 교환기 시제품을 장착하여 폐열 회수율을 측정하는 실제 열 교환기 성능시험 모습을 나타낸 사진이다.

본 열 교환기에서의 폐열 회수 효율을 산출하기 위해서는 식 (2)의 온도효율 가운데 저온

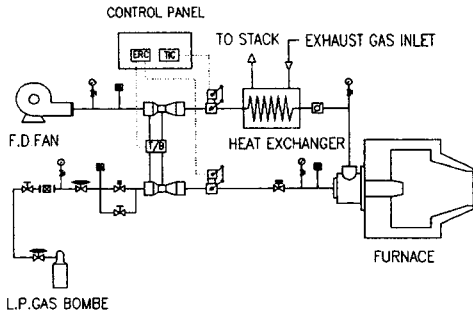


Fig. 6 System layout of performance test equipments for heat exchangers

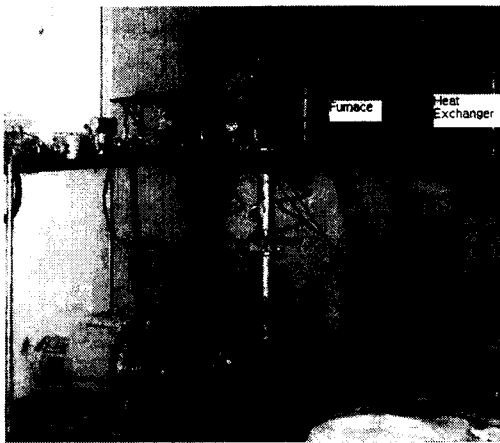


Fig. 7 A photograph showing the performance test equipments of the developed heat exchanger

측 온도효율을 계산 공기 및 배기가스의 입출구 온도를 열전대(J 및 K type thermocouple)와 computer-aided Data Acquisition System을 사용하여 주어진 시간동안 데이터를 저장토록 하였다. 배기가스 온도는 세라믹 코아의 보호를 위하여 1200℃가 넘지 않도록 설정온도를 1000℃에서부터 100℃씩 단계적으로 올렸으며, 필요에 따라 버너의 정격용량의 25~100% 범위에서 가변시켜 가며 시험하였다. 흡입공기는 실험실 내 상온의 실내공기를 그대로 사용하는 것으로 하였다. 시운전 결과 모든 장치 및 계기는 정상적으로 작동하였으며, 각종 DAS를 이용한 측정 또한 순조롭게 진행되었다.

Fig. 8은 배기가스 온도를 1100℃로 설정하였

을 때 설정온도에 도달할 때까지 약 1시간 동안의 각 지점에서의 온도 변화를 나타내는 그래프이다. 이 때 흡입공기는 실내공기를 사용함에 따라 연소로 가동 시에는 실내 온도가 상당히 올라갈 우려가 있어 실내공기를 외기와 충분히 환기토록 하였으며 이에 따라 실내공기 온도는 외기 온도에 영향을 받아 조금씩 변화하였으나 대략 25~30℃ 범위에 있었다. 이는 다른 측정 온도에 비하여 상대적으로 매우 낮은 온도여서 열효율 계산 값에는 별로 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다.

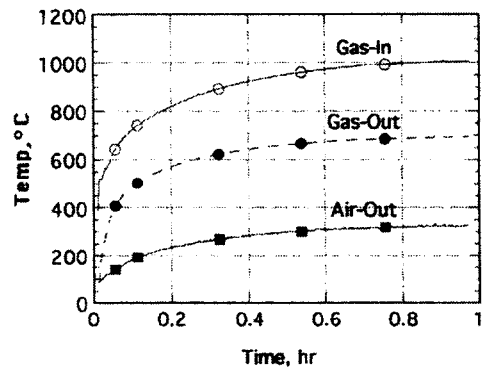


Fig. 8 Temperature variations in the inlets and outlets of the heat exchanger for gas-inlet of 1100℃ and air-inlet of 25℃

Table 2는 설정 배기가스의 온도 변화에 따른 예열 공기의 측정온도 및 이들로부터 산출된 폐열 회수효율을 나타내고 있다. 표에서 보는 바와 같이 배기가스 온도 1000℃, 1100℃와 1200℃에 대하여 열 교환에 의한 예열 공기의 온도는 각각 약 325℃, 403℃, 472℃까지 올라가는 것으로 나타났으며, 이때의 폐열 회수효율은 각각 31%와 35%, 그리고 39%에 이르는 것으로 나타났다. 이는 미국 등 선진국에서 상용화된 동종의 열 교환기에 대하여 보고되고 있는 에너지 절감율 35~45%와 매우 흡사한 것으로 나타나 본 열 교환기의 제조상태가 양호함은 물론 기존의 열 교환기에 비해서도 실제로 폐열 회수 성능이 상당히 우수하다는 것을 보여준다.

이러한 폐열 회수율을 근거로 할 때 절감되는 에너지의 양은 본 열 교환기 1대 사용을 기준

Table 2 Performance test results of 1-pass heat exchanger for 150,000 Kcal/hr burner capacity

| Exhaust Gas Temp.(°C) | Gas Outlet Temp.(°C) | Preheated Air Temp.(°C) | Heat Recovery Coefficient(%) |
|-----------------------|----------------------|-------------------------|------------------------------|
| 1000                  | 685                  | 325                     | 31                           |
| 1100                  | 706                  | 403                     | 35                           |
| 1200                  | 700                  | 472                     | 39                           |

으로 할 때 버너 용량 150,000 Kcal/hr당 최고 약 60,000 Kcal/hr에 이르게 되며, 큰 용량의 로에 대해서는 여러 대의 버너와 열 교환기를 동시에 사용이 가능하므로 이 경우에는 에너지절감 양도 비례해서 증가하게 된다. 본 열 교환기의 폐열 회수효율을 근거로 할 때 사용빈도에 따라 차이가 나겠지만 약 1~2년이면 설치비를 완전히 회수할 수 있을 것으로 판단된다.

본 열 교환기에 대한 실험 결과 본 열 교환기가 1-pass에 대한 이론적 열 교환효율에 상당히 근접한 것으로 미루어, 본 열 교환기에 사용된 세라믹 코아를 이용하여 3-pass 방식의 열 교환기로 제작할 경우 이론적 3-pass 열 교환 효율인 65%에 상당히 근접할 것으로 예측되는 바, 같은 배기가스 용량을 기준으로 할 때 크기 및 제작비 증가라는 불구하고 에너지절감 효과와 더불어 충분한 경제성 검토를 할 필요가 있다고 판단된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 기존의 금속제 폐열 회수장치

에 비해 1200°C까지의 고온의 배기가스에 직접적으로 사용할 수 있고, 최고 40%의 고효율이면 서도 설치 크기는 콤팩트한 직교흐름 방식의 공기 예열식 열 교환기를 개발하고, 그 폐열 회수 성능을 입증하였다. 이를 위하여 저열팽창성의 세라믹 코아 소재 개발 및 진공 압출 성형기술, 그리고 본딩 기술을 개발하였으며, 세라믹 코아의 열 용력 저감을 위한 현가 실링 장치를 개발, 적용함으로써 열 교환기의 안전성을 크게 증가시켰다.

### 참 고 문 헌

- 1) E.A. Foumeny & P.J. Heggs, Industrial Heat Exchangers, Lecture Series No. 1991-04, Belgium, 1991.
- 2) R.K. Shah, Compact Heat Exchangers, 1994.
- 3) W.M. Kays & A.L. London, Compact Heat Exchangers, McGraw-Hill, 1984.
- 4) A.J. Hayes, W.W. Liang, S.L. Richlen, E.S. Tabb, Industrial Heat Exchangers, ASM's Energy Division, 1985.
- 5) G.F. Hewitt, Handbook of Heat Exchanger Design, Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- 6) F.P. Incropera & D.P. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3rd ed., John Wiley & Sons, 1990.