

고온 세라믹 폐열회수장치의 안전성 향상 연구

A Study on the Safety Improvement of the High Temperature Ceramic Heat Recovery System

박 용 환* · 강 영 구** · 김 홍**

Yong-Hwan Park · Young-Goo Kang · Hong Kim

(1996년 9월 12일 접수, 1996년 12월 14일 채택)

ABSTRACT

A study to improve the safety of the ceramic heat exchanger in the high temperature heat recovery system was performed in terms of air flow passes. The numerical and finite element analyses on the heat transfer and thermal stresses in the ceramic core related with air passes were carried out. The results showed that the stresses in the ceramic core induced by the thermal expansion are large enough to cause failure of the brittle ceramic core. The employment of triple-pass air flow for the same ceramic core could increase the efficiency and effectively release approximately 20% of the maximum thermal stress, thus improving the safety of the ceramic heat exchanger. The use of triple-pass, however, is limited by the amount of air flow due to the increase of pressure drop.

1. 서 론

금속의 열처리, 알루미늄 용해, 금형, 단조 및 내화업계에서 사용되고 있는 공업로는 대부분 연료 연소시에 800℃ 이상의 고온의 배기가스를 배출하고 있는 까닭으로 이들 고온의 배기가스로부터 폐열을 회수, 에너지를 절감하고자 하는 노력

이 이루어지고 있다. 이를 위하여 연소공기를 고온으로 예열하여 로(furnace)내로 재투입함으로써 연소 효율을 향상시켜 에너지 절감을 꾀하고자 하는 레큐퍼레이터(recuperator) 열교환기가 많이 활용되고 있다^{1,2)}.

현재 국내에서 제작되고 있는 고온 폐열회수형 레큐퍼레이터는 핵심 코어가 탄소강이나 SUS계

* 한국기계연구원 기계구조그룹

** 호서대학교 안전공학부

금속 소재로 되어 있어 허용 배기가스의 온도가 400℃~700℃로 제한되기 때문에 폐열회수 효율이 20% 이하로 매우 낮은 실정이다. 그러나 핵심 코어를 800℃ 이상의 배기가스에서도 직접 사용될 수 있는 초고온 내열성 세라믹으로 할 경우 폐열회수 효율이 30%~60%로 크게 증가할 수 있는 것으로 알려져 있다^{3,4)}.

본 연구에서는 배기가스와 공기가 cross-flow로 통과하고 사이즈가 compact한 matrix형 세라믹 열교환기에 대하여 그 안전성에 가장 큰 영향을 미치는 세라믹 코어에 대한 열응력을 최소화하기 위한 방안으로 예열공기의 통과횟수 변화에 대한 열전달 성능과 구조적 안전성을 확보하기 위한 열응력/변형 해석을 수행하고 그 특성을 서로 비교하였다.

2. 이론 및 수치 해석

2.1 해석 모델

본 세라믹 열교환기는 cross-flow에 의한 열교환 방식을 채택하고 있다. 핵심이라고 할 수 있는 세라믹 코어는 Fig. 1에서와 같이 주사위 모양의 box type으로 되어 있으며 MAS계의 Mixed oxide 소재로 되어 있다. MAS계 소재는 비교적 성형이 용이하고 열팽창계수가 낮아 열변형이 적고 열충격성이 뛰어나며 내열, 내식성도 비교적 우수하여 1200℃까지의 배기가스에는 사용이 가능하다. 세라믹 코어의 외부에는 내화 단열 캐스터블로 감싸져 있는데 요동을 방지하고 통과기체의 실링을 위하여 가장자리에는 내화 단열 캐스터블로부터 일정한 압축력을 받게끔 되어 있어 가열시에는 열팽창에 의한 열응력이 발생하므로 이에 대한 안전성 확보가 필수적이다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 본 세라믹 코어는 가스측 통로와 공기측 통로가 교대로 지그재그로 적층되어 있는 형태이다. 가스측의 cell 크기와 공기측의 cell 크기는 열전달 효율, 압력강하(pressure drop), 제작의 난이도 등을 고려하여 결정되며 특히 가스측 cell의 경우 배기가스의 불완전 연소에 따른 plugging을 방지하고 크리닝시의 편의를 도모하기 위하여 통로의 높이를 공기측 cell에 비해 약 3배 정도 높게 설계한다.

제한된 코어의 외곽치수 범위 안에서 열전달 면

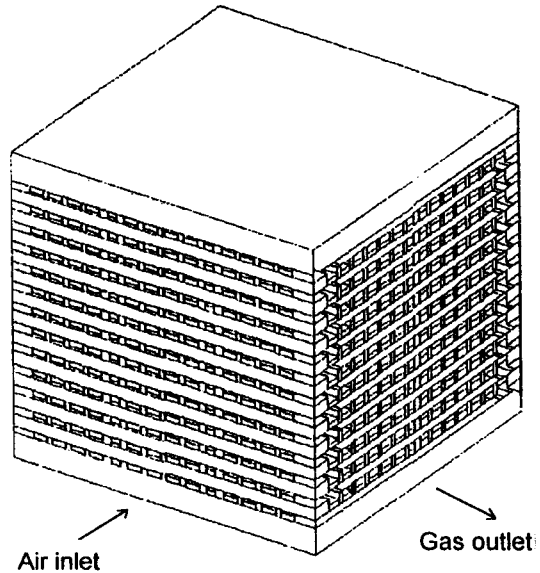


Fig. 1 The ceramic recuperator core

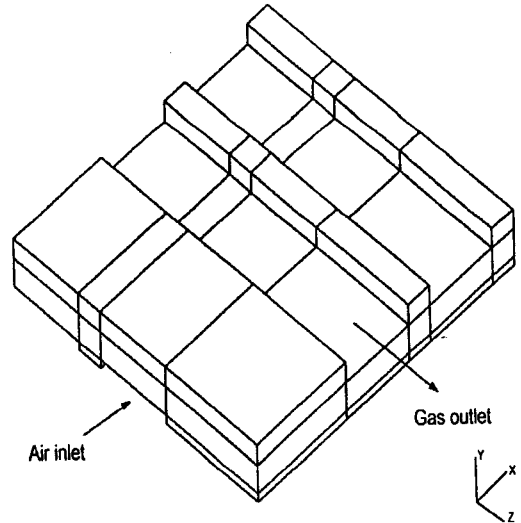


Fig. 2 The unit layer model

적을 증가시키고 기류의 pressure loss를 극소화하기 위해서는 cell 수를 많게 하고 cell간의 rib 두께를 최소화하는 것이 바람직하지만, 코어의 강도 및 성형기술의 난이도를 고려하여 cell 수 및 rib의 두께가 결정된다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 세라믹 코어는 공기와 배기가스가 지나는 유체통로가 적층방향으로 번갈아 나타나므로 각각의 layer는

모두 똑같은 조건에서 작동한다고 가정하였다. 따라서 열전달 및 열응력 해석은 Fig. 2와 같이 가스측과 공기측을 각각 1/2 층씩 포함하는 하나의 unit layer에 대하여 열전달 효율, 압력손실, 열응력 분포 등 이론적 해석을 통하여 성능 및 안전성 평가를 수행하였다.

열교환기는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 예열공기의 세라믹 코아 통과 횟수에 따라 1-pass 및 3-pass가 있는데, 1-pass의 경우 버너 연소용 찬공기는 blower에 의해 로에서 발생된 고온의 배기가스 유동방향에 수직으로(cross-flow) 흡입되고 세

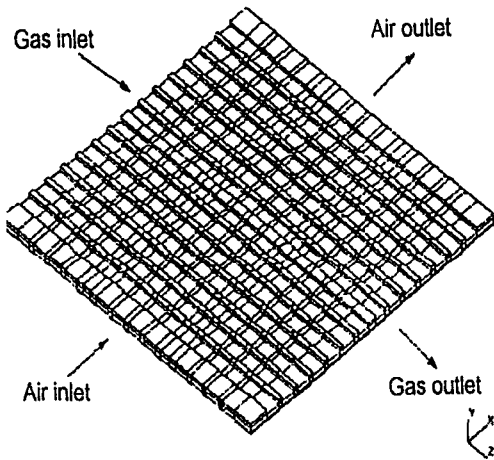


Fig. 3(a) Single-pass air flow

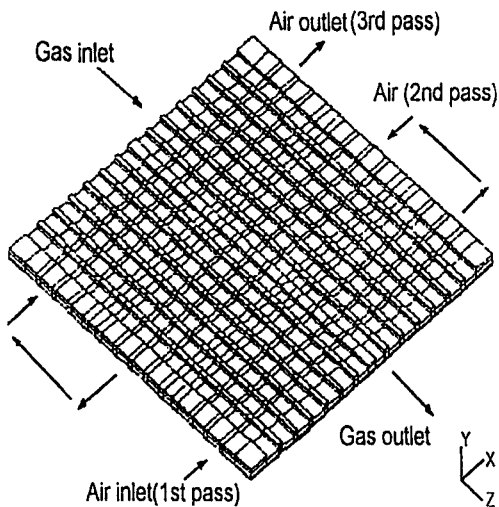


Fig. 3(b) Triple-pass air flow

라믹 코아에서 배기가스와의 열교환에 의해 예열된 다음 공기 배출구를 통해 버너로 들어간다. 그러나 3-pass의 경우에는 배기가스 배출구에 가까운 쪽에서 흡입된 공기가 공기의 흐름방향을 제어하는 공기 차폐장치에 의해 세라믹 코아를 세차례 통과한 다음 배기가스 흡입구에 가까운 쪽으로 빠져나간다.

2.2 열전달 해석

세라믹 코아내의 열응력 분포를 알기 위하여는 먼저 온도 분포에 대한 열전달 해석이 선행되어야 한다. 온도 분포는 다음과 같은 3차원, 비정상, 전도 방정식을 통해 결정된다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (1)$$

여기서 ρ , c , k 는 각각 세라믹 코아 재료의 밀도, 비열 및 열전도도로서 통상 온도의 함수로 주어진다.

Fig. 2에서 윗면($y=y_{top}$)과 아랫면($y=0$)은 모두 대칭 조건을 적용하였다. 공기 흡입면($z=0$)과 배출면($z=z_{back}$) 그리고 공기가 지나가는 유체 통로의 모든 벽면, 배기가스 흡입면($x=0$)과 배출면($x=x_{east}$) 그리고 배기가스가 지나가는 유체통로의 모든 벽면에서는 대류에 의해 열전달이 이루어지므로 다음과 같은 경계조건을 적용한다.

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h_f(T_f - T_w) \dots \dots \dots (2)$$

여기서 n 은 벽면에서부터 물체의 안쪽으로 향하는 수직 거리를 나타내고, T_f 와 T_w 는 각각 내부 유체의 평균 온도와 벽면에서의 온도를 나타낸다. 이때 대류 열전달계수 h 는 다음과 같이 경험적인 방법으로 계산한다. 먼저 유체유동이 층류와 난류인 경우로 구분하여 다음의 실험식을 이용하여 Nusselt number를 계산한다⁵⁾.

층류유동 ($Re_D < 2300$) :

$$Nu = 3.66 + \frac{0.19 [Re_D Pr (D_h/L)]^{0.8}}{1 + 0.117 [Re_D Pr (D_h/L)]^{0.467}} \dots \dots (3)$$

난류유동 ($Re_D > 2300$) :

$$Nu = \frac{f/8 (Re_D - 1000) Pr}{1 + 12.7 \sqrt{f/8} (Pr^{2/3} - 1)} [1 + (D_h/L)^{2/3}] \dots (4)$$

여기서 D_h 는 유체통로의 수력반경을, L 은 유체

통로의 길이를 나타낸다. 그리고 난류유동일 경우 난류유동에서의 마찰계수 f 는 다음과 같은 경험식으로 계산된다⁶⁾.

$$f = (1.82 \log_{10} Re_D - 1.64)^{-2} \dots\dots\dots (5)$$

그 다음은 Nusselt number의 정의식에서 다음과 같이 대류 열전달계수를 구한다.

$$h = Nu \frac{k_f}{D_h} \dots\dots\dots (6)$$

여기서 k_f 는 공기나 가스의 열전도계수를 나타낸다. 그리고 압력강하량은 세라믹 열교환기의 입구와 출구사이에서 돌연축소, 유로마찰, 돌연확대 등을 고려하여 구하였는데, 각각의 손실계수는 참고문헌⁶⁾에 잘 나타나 있다.

비정상, 3차원 열전도 방정식에 대해 시간상으로는 Euler 양함수법(Explicit Scheme)을, 공간상에서는 Patankar⁷⁾의 유한체적법을 이용하여 차분방정식을 구하였다. 계산은 초기온도 분포로부터 출발하여 시간이 진행되는 것과 함께 차례로 수행되고, 충분히 오랜 시간이 경과한 후의 해를 구하여 정상상태의 온도분포로 처리하였다.

식(2)에서 공기와 개스의 단면 평균 온도 T_f 는 유체 통로를 지나는 동안의 가열 또는 냉각되는 온도로 다음과 같은 에너지 평형식을 이용하여 임의의 위치에서의 평균 온도 값을 구할 수가 있다.

$$q_w = m C_p (T - T_{inlet}) \dots\dots\dots (7)$$

여기서 m 과 C_p 는 각각 유체 통로를 지나는 유체의 질량유량과 유체의 정압 비열을 나타낸다. 그리고 q_w 는 입구에서 부터 계산 위치까지 유체 통로 전표면을 통하여 유체로 전달된 열량을 의미하며 세라믹 코아내의 온도 분포가 결정되면 구할 수 있다. 공기의 열전도도와 정압 비열은 온도의 함수로 나타내어 사용하였다. 고온 배기가스는 연료와 공기의 혼합물이 연소한 가스이므로 공기와는 다른 가스이다. 그러나 보통은 연료에 비해 공기의 양이 지배적이므로 연소가스와 공기의 성질에 큰 차이는 없다. 본 연구에서는 고온 배기가스의 성질로 고온공기의 성질을 그대로 사용하였다.

여기서 계산되는 공기와 가스의 평균 온도는 세라믹 코아내의 온도 분포 계산시 식(2)에서 경계조건으로 이용되는데, 이 온도들은 구조물내의 온도 분포가 알려져야 계산될 수 있는 값이다. 그러므로 이 온도들을 가정하여 전도방정식의 해를 먼저 구하고, 그 결과에서 이 온도들을 계산하여 다

시 전도방정식의 해를 구하는 반복 계산 과정을 거쳤다.

본 해석의 결과는 유사한 실험이나 계산 결과가 없어서 그 타당성 확보가 쉽지 않다. 그리하여 참고문헌^{6,7)}에 제시된 열교환기 성능 해석 방법($\epsilon - Ntu$ 방법)을 이용하여 그 결과를 비교하여 보았다. 이 방법은 널리 쓰이고 있을 뿐만 아니라 고온 유체와 저온 유체의 대류 열전달계수만 정확하게 입력시키면 아주 좋은 결과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러므로 두 방법에서 동일한 대류 열전달계수를 사용하여 계산하고 그 결과를 비교함으로써 본 해석 방법의 타당성을 확보하도록 하였다. 본 해석에서 공기 유량은 5500, 10000 및 16500scfh로 변화시켜 가며 계산을 수행하였는데, 각각의 경우에 대하여 고온 가스 유량 대 공기유량의 비는 온도에 관계없이 1.091배를 사용하였고 공기의 입구 온도와 고온 배기가스의 입구 온도는 각각 298.15°K와 1366.48°K를 사용하였다.

2.3 열응력 해석

세라믹 코아에서는 열팽창 및 온도 구배에 따른 열응력에 대한 안전성 검토가 요구된다. 세라믹 코아는 복잡한 형상으로 되어 있어 해석적 방법(analytical method)으로 변형 및 응력분포를 예측하기는 매우 어렵기 때문에, 수치 해석 방법인 유한요소법(finite element method)을 사용하여 세라믹 코아에 작용하는 응력 분포를 얻고자 하였으며, 이를 위하여 NISA II 상용 package를 이용하여 해석을 수행하였다^{8,9)}.

세라믹 코아의 열응력 해석을 위한 유한요소 모델의 형상은 열전달 해석에 사용되었던 Fig. 2의 unit layer와 같다. FEM 모델링을 위하여 8개의 node로 구성되어 있는 3차원 고체요소(3-D solid element)를 사용하였다. 사용된 세라믹 소재의 탄성계수(Young's Modulus)는 600kg/mm², 포아슨비는 0.17, 열팽창계수는 1.50×10⁻⁶/°C로 하였다.

열응력 계산을 위하여 공기측 입구 온도를 25°C, 가스측 입구 온도를 1093°C로 하였을 때 열전달 계산에 의해 얻어진 온도 분포 결과를 이용하였는데 통과하는 공기량이 열응력에 미치는 영향을 검토하기 위하여 공기량 16500scfh, 10000scfh

두 경우에 대하여 열응력 크기를 계산하였다. 또한 세라믹 코아의 성능 및 안전성을 평가하기 위하여 3-pass 열교환기에 대한 해석도 수행하여 그 결과를 1-pass의 경우와 비교하였다.

경계 조건으로서는 세라믹 코아 가장자리에 실링을 위한 압축력이 균일하게 작용하는 것으로 가정하여 가스/공기 입구의 gasket seat 가장자리는 고정하고 출구쪽 gasket seat area는 iso-strain 조건으로 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도 분포

먼저 열전달 수치 해석의 타당성 검토를 위하여 실시한 열교환기의 유효도 계산 결과를 보면 Table 1에서 보는 바와 같이 1-pass 및 3-pass 열교환기에 있어서 $\epsilon - Ntu$ 방법과 본 연구에서의 수치 해석 결과 간에 나타나는 오차가 공기 유량의 변화에도 불구하고 대략 1.1% 정도로 근접한 결과를 보이고 있어 그 타당성을 확신할 수 있었다.

Table 2는 1-pass 및 3-pass에 대하여 열전달 해석을 통하여 얻어진 세라믹 코아의 성능평가 결과를 요약한 것이다

Table 1 The efficiency computed by numerical method and $\epsilon - Ntu$ method

Type	Air Flow Rate (scfh*)	Ntu	Cmin / Cmax	Efficiency (Computation)	Efficiency ($\epsilon - Ntu$)
1-pass	5,500	0.5	0.75	0.339	0.333
	10,000	1.0	0.75	0.503	0.505
	16,500	1.5	0.75	0.598	0.608
3-pass	5,500	0.5	0.5	0.355	0.352
	10,000	1.0	0.5	0.539	0.545
	16,500	1.5	0.5	0.650	0.662

* scfh : standard cubic feet per hour

Table 2 Outlet temperatures and pressure drops in the ceramic core

Air flow rate (scfh)	Air temp. outlet (°C)		Gas temp. outlet (°C)		Air pressure drop, mmAq		Gas pressure drop, mmAq
	1-Pass	3-Pass	1-Pass	3-Pass	1-Pass	3-Pass	
16500	304	609	889	937	222	7849	71
10000	366	724	841	908	93	3149	30
5500	375	787	822	971	32	1077	12

Table 2에서 보면 각 pass에 있어서 동일한 입구 온도에 대하여 공기 유량이 작아질 수록 공기의 출구 온도는 증가하는 한편 공기와 가스쪽 압력강하량은 작아지는 것을 알 수 있다. 그리고 같은 공기 유량에 대하여 3-pass 형태가 1-pass 형태보다 공기의 온도가 훨씬 높아지는 것을 알 수 있다. 물론 3-pass일 경우 통과 공기의 압력강하량은 1-pass일 때와 비교가 안될만큼 크게 된다. 이것은 압력강하가 속도의 제곱에 거의 비례하는데, 3-pass 형태가 되면서 공기가 지나는 유로 면적이 3배 이상 작아지면서 공기 속도는 3배 이상 증가하기 때문이다. 이 점은 동일한 크기의 세라믹코아를 3-pass로 쓸 경우 공기용 blower의 최대 용량이 크게 증가되어야 함을 의미한다.

위의 각 경우에 대한 unit layer의 중간 단면에 대한 온도 분포 계산 결과가 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타나 있다. Fig. 4(a)~(c)에서 보면 1-pass 세라믹 코아인 경우 공기 유량이 변화할 때 온도값의 크기는 어느 정도 차이를 나타내고 있으나, 그 분포 경향은 거의 유사하게 나타났다. 즉 고온가스의 입구와 출구 부근에서는 높은 온도를 나타내는 반면 공기의 입구와 출구 부근에서는 낮은 온도를 나타내었다. 그리고 온도 분포는 코아 단면의 대각선을 중심으로 대칭 형상을 띠고 있다. 그러나 배기가스쪽과 공기쪽 모두 중심선을 따라 다른 부분보다 두꺼운 rib를 사용하는 관계로 부분적으로 높거나 낮은 온도 분포를 보이고 있다.

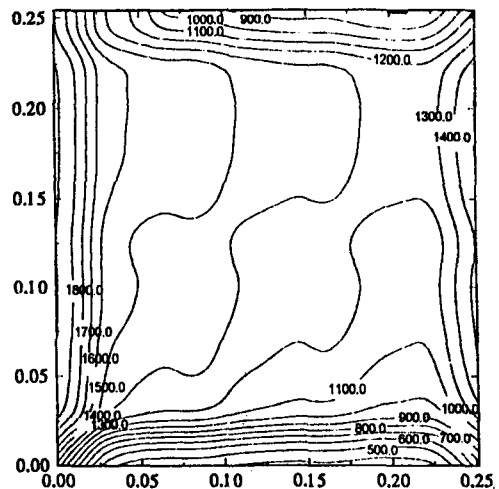


Fig. 4(a) Temperature(°F) distribution in the ceramic core at the air flow rate of 5500 scfh (1-pass)

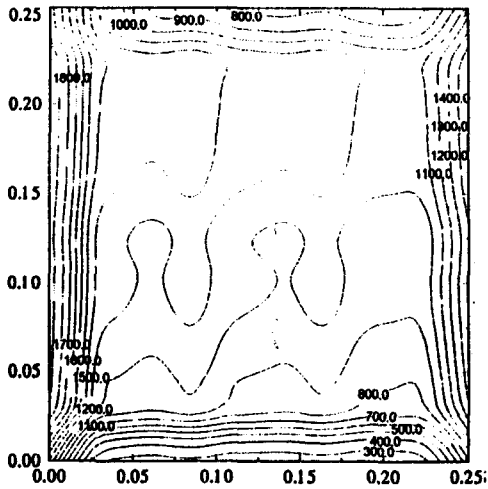


Fig. 4(b) Temperature(°F) distribution in the ceramic core at the air flow rate of 10,000 scfh (1-pass)

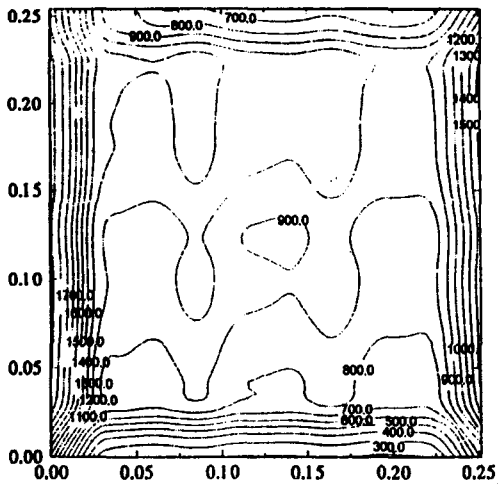


Fig. 4(c) Temperature(°F) distribution in the ceramic core at the air flow rate of 16,500 scfh (1-pass)

각 경우 모두 모통이 부분에서 온도 구배가 심한 반면 중앙에는 아주 완만한 온도 구배를 보여준다. 특히 가스와 공기가 모두 유입되는 모통이에서의 온도 구배가 가장 크다.

그러나 Fig. 5(a)~(c)에서 보는 바와 같이 동일한 공기 유량에 대하여 3-pass 세라믹 코아의 경우

가장 심한 온도 구배 구간의 온도차는 1-pass 세라믹 코아의 그것에 비해 훨씬 작은 경향을 나타내고 있다. 특히 3-pass에 있어서는 가장 심한 온도 구배 부분이 가스 출구쪽 즉 낮은 온도 부분으로 옮겨져 있다.

공기량과 공기 통과 횟수의 변화에 따른 열응력 해석 결과가 Table 3에 나타나 있다.

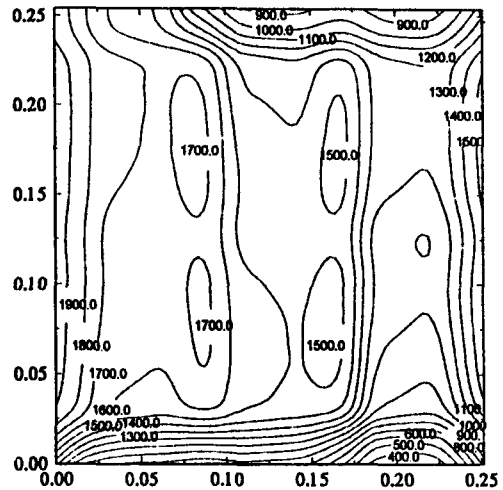


Fig. 5(a) Temperature(°F) distribution in the ceramic core at the air flow rate of 5500 scfh (3-pass)

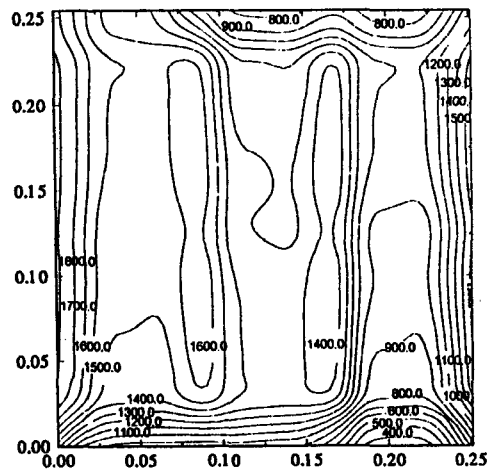


Fig. 5(b) Temperature(°F) distribution in the ceramic core at the air flow rate of 10,000 scfh (3-pass)

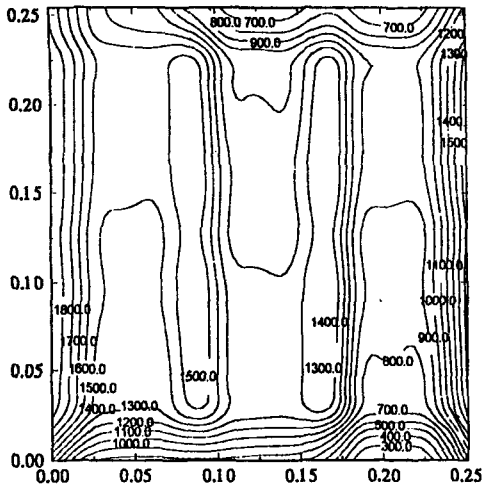


Fig. 5(c) Temperature(°F) distribution in the ceramic core at the air flow rate of 16,500 scfh (3-pass)

Table 3 Results of the thermal stress analyses for various air flow rates and pass types

Pass type	Air flow rate (scfh)	Max. displacement (mm)	Max. principal stress (kg/mm^2)	Safety factor
1-pass	10,000	0.298	0.603	4.0
	16,500	0.273	0.629	3.8
3-pass	10,000	0.355	0.488	5.0
	16,500	0.326	0.524	4.6

1-pass의 경우, 공기량이 16,500 scfh 일때와 10,000 scfh인 경우를 비교해 보면 최대 주응력은 각각 $0.629kg/mm^2$, $0.603kg/mm^2$ 로 두 경우 거의 유사하게 고온 배기가스 입구와 흡입공기의 입구 부근에서 발생했으며, 최대 변위는 통로 출구 끝단에서 0.273mm, 0.298mm로 각각 나타났다.

Fig. 6은 공기량이 16,500 scfh이고, 1-pass인 경우에 주응력의 크기 및 분포를 나타내고 있다. 3-pass의 경우, 공기량이 16,500 scfh와 10,000 scfh 일때의 최대 주응력은 모두 공기의 첫번째 flow 입구에서 발생하였으며 각각 $0.524kg/mm^2$, $0.488kg/mm^2$ 로 계산되었다. 최대 변위는 역시 출구 끝단에서 0.355mm와 0.326mm로 계산되었다.

Fig. 7은 3-pass의 경우 공기량 10,000 scfh일 때의 주응력의 크기 및 분포를 나타내고 있다. 이는

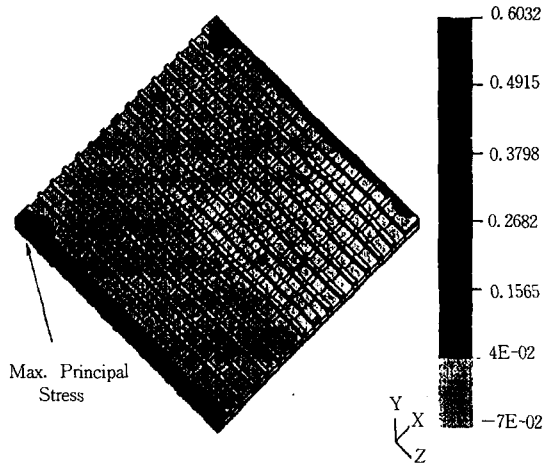


Fig. 6 The principal stress distribution in the 1-pass ceramic core unit layer at the flow rate of 10,000 scfh

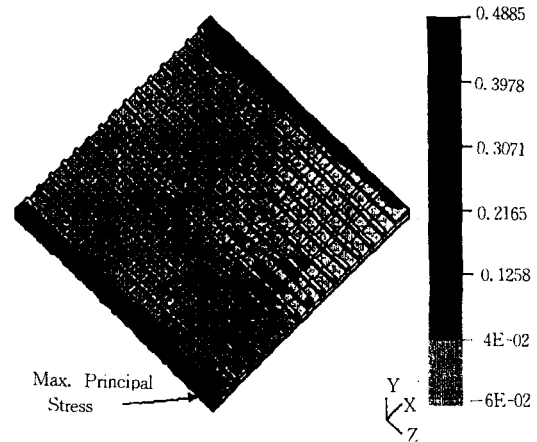


Fig. 7 The principal stress distribution in the 3-pass ceramic core unit layer at the flow rate of 10,000 scfh

동일한 운전 조건하에서는 3-pass의 경우 1-pass에 비하여 약 20% 정도의 열응력 감소 효과가 발생하는 것으로 나타났으며 세라믹 코어의 안전성 향상에 크게 기여할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

이상으로 세라믹 코아에 대한 열응력 및 변형 해석결과를 정리해 보면, 동일한 경제조건에 대하여

공기량 및 공기흐름 방식에 따라 최대 주응력 및 최대 변형량에서 상당한 차이가 발생하고 있음을 알 수 있었다. 같은 공기량에 대하여 공기 흐름 방식이 3-pass의 경우 1-pass에 비하여 예열공기의 온도가 훨씬 높아짐으로써 폐열 회수율은 크게 증가한 반면 코아내 열응력은 약 20% 정도 크게 줄어들어 열효율 성능 뿐만 아니라 안전성 면에서도 우수한 것으로 나타났다. 그러나 3-pass 방식을 채택할 경우에는 공기 압력강하가 크게 증가하게 되므로 본 모델에 대하여는 가능한 한 공기량을 최고 10,000 scfh 이하로 사용하는 것이 바람직하다고 본다.

같은 경계조건에 있어서 통과 공기량이 증가하게 되면 최대 열응력도 같이 증가하게 되어 세라믹 코아의 안전성은 더욱 떨어지게 되므로 이를 해소하기 위한 방안의 모색이 요구된다. 이러한 안전성 확보 방안으로 저열팽창성 세라믹 소재의 사용, 현가장치를 사용한 실링부 경계조건의 개선 등에 관한 지속적인 연구가 요망된다.

참 고 문 헌

- 1) Walker, G. "Industrial Heat Exchangers-A Basic Guide", 2nd Edition, Hemisphere Washington DC, 1990.
- 2) Buchlin J. M., "Industrial Heat Exchangers", Lecture Series No. 1991-04, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Belgium, 1991.
- 3) Martin H. "Heat Exchangers", Hemisphere Publishing Corp., Washington DC, 1992.
- 4) Shah R. K., Kraus A. D., and Metzger D., "Compact Heat Exchangers-A Festschrift for A. L. London", Hemisphere, Washington DC, 1990.
- 5) Spalding D. B., et. al., "Heat Exchanger Design Handbook", Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
- 6) Incropera F. P. & DeWitt D. P., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 3rd ed., John Wiley & Sons, 1990.
- 7) Patankar S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- 8) Bathe, Klaus-jurgen, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- 9) NISA II/DISPLAY II Users Manual, Engineering Mechanics Research Corporation, 1990.