

# 고효율 세라믹 열교환기 설계를 위한 이론해석 및 CFD시뮬레이션에 관한 연구

박경서, 최중균, 남진현, 신동훈, 정태용, 박상환\*, 김창삼\*  
국민대학교, \* 한국과학기술원

## A study on theory analysis and CFD simulation for design of high efficiency ceramic exchanger

Kyungseo Park, Chong Gun Choi, Jin Hyun Nam, Dooghoon Shin, Tae Yong Jung,  
Sanghwan Park\*, Chang-Sam Kim\*  
Kookmin University, \*KIST

### Abstract

현재 대부분의 산업용 열기관은 효율을 높이기 위하여 연소에 사용되는 공기를 예열하는 방법을 사용한다. 하지만, 산업용 열기관에서 평균적으로 발생하는 1000℃ 이상의 배기가스는 일반 금속 열교환기에는 적합하지 않다. 이에 반해 세라믹 열교환기의 경우 고온에서 견디는 장점이 있다.

본 연구에서는 기본적인 열교환기 설계 이론을 이용하여 설계프로그램을 제작하였다. 또한 세라믹 열교환기 내 열 유체 거동을 CFD 상용코드인 FIUENT 6.2를 이용한 전산해석을 수행하여 설계결과를 비교 검증하였다.

설계 결과에서 환의 형태 변화에 따라 열전달율과 온도구배는 무시할 수 있을 정도로 작았으나, 압력강하는 크게 변동되는 결과가 도출되었다. 제한된 모듈 크기에서 환 간거리는 환의 두께에 비해 약 3배 이상 클 경우가 적당하며, 판(plate)의 두께는 작을수록 압력손실이 적고, 열전달율이 상승하지만 두께가 너무 얇게 된다면 제작상의 어려움이 생긴다.

향후 연구에서는 단순한 구조에서 벗어나 off-set이나 판형구조를 고려하여 설계함으로써 열전달 면적을 넓히거나 난류유동을 발생시켜 열전달율을 높이는 연구를 진행 할 필요가 있다.

### 기호 설명

C : 유동 열용량	$C_{max}$ : 가스과 공기의 유동 열용량 중 적은 값
$R_c : C_{min}/C_{max}$	$C_{min}$ : 가스과 공기의 유동 열용량 중 큰 값
$H_g$ : 가스측 환 높이 [mm]	U : 총 열전달 계수
$N_{tu} : UA/C_{min}$	$H_a$ : 공가측 환 높이 [mm]
P : 환 사이 거리[mm]	t : 방열판 기저부 두께 [mm]
D : 환 두께 [mm]	$K_c$ : 수축계수(contraction coefficient)
$A_c$ : 중심 내부 유동에 대한 단면적 [ $m^2$ ]	$K_e$ : 팽창계수(expansion coefficient)
$A_{fr}$ : 전면적 [ $m^2$ ]	$\rho_m$ : 유체의 평균밀도 [ $kg/m^3$ ]
$D_h$ : 수력직경 [m]	$V_m$ : 유체의 평균속도 [m/s]
L : 유체가 지나는 통로의 길이 [m]	A : 열전달 면적 [ $m^2$ ]

### 1. 서론

산업용으로 사용되는 공업로는 대부분 연소 시 800℃ ~ 1000℃ 정도의 고온 배기가스가 배출되고 있기 때문에, 이들 배기가스로부터 폐열을 회수하여 에너지를 절감하고자 하는 노력이 이루어지고 있다. 이를 위하여 연소공기를 고온으로 예열하여 로(furnace)내로 재투입하는 방법이 흔히 사용된다<sup>1)</sup>.

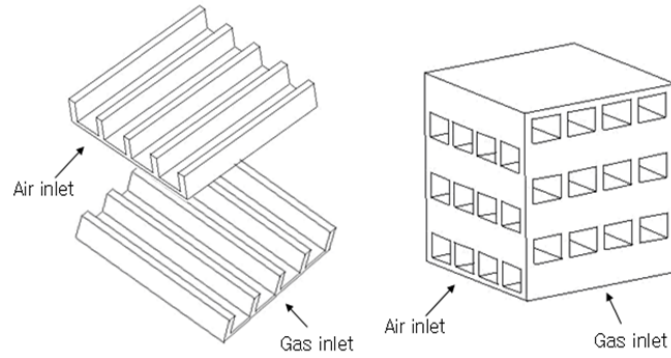


Fig.1 The ceramic heat exchanger module

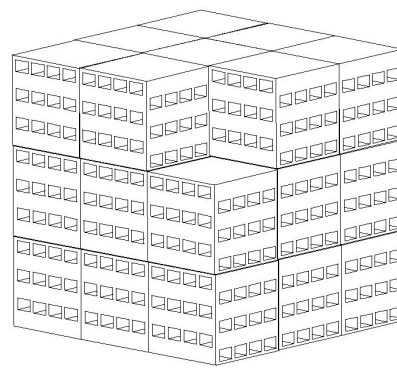


Fig.2 The Geometry of ceramic heat exchanger

현재 폐열회수에 사용되는 열교환기는 대부분 금속소재로 되어 있어 허용 배기가스 온도가 400℃~700℃로 제한되어 있다. 이에 따라 배기가스의 온도를 낮추는 공정이 추가되어 에너지 회수 효율이 20 % 이하로 낮게 나타난다.

그러나 고온에서 견딜 수 있는 세라믹을 사용할 경우 에너지 회수효율이 30% ~ 60%로 증가하는 것으로 알려져 있다<sup>2)</sup>.

본 연구에서는 제작의 용이성을 고려하여 단순한 사각 흰 형태(matrix 형)를 사용하였으며, 안정성과 최대 효율을 위하여 각 설계변수에 따른 열전달 성능과 체적당 열전달율을 고려하여 해석을 수행하고 각 결과의 특성을 비교하였다.

## 2. 이론

### 2.1 해석 모델

본 세라믹 열교환기는 200 × 200 × 200 (mm)크기의 모듈로 Unmixed cross-flow 방식을 사용한다. 열교환기에 사용된 세라믹은 현재 개발 단계에 있는 C<sub>f</sub>-SiC계열이며, Thermal Conductivity는 170 W/mK 으로 알려져 있다. C<sub>f</sub>-SiC계열은 열변형이 적고 열충격에 뛰어나며, 1200℃ 정도의 배기가스에서 사용가능하다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 본 열교환기는 최종적으로 세라믹 모듈을 적층하여 사용하게 된다. 또한 제작의 편리성을 고려하여 단순한 사각 흰 형태를 사용하였다.

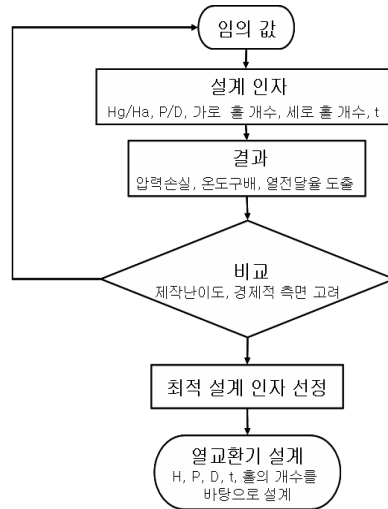


Fig.3 The design diagram of ceramic heat exchanger

가스측과 공기측의 홀 크기는 열전달 효율, 압력강하, 제작의 난이도, 최소 허용두께를 고려하여 결정된다. 제한된 모듈 크기에서 열전달 면적을 증가시키고, 압력강하를 최소화하기 위해서는 홀의 너비를 증가시키고, 환의 두께를 최소화하는 것이 적절하다. 하지만 세라믹의 최소 허용 두께 및 세라믹 성형의 난이도를 고려한다면 설계조건에 제한이 생기게 된다. 이를 위해 설계 프로그램을 제작하였으며, 환 사이 거리(P)/환 두께(D), 가스측 환 높이(H<sub>g</sub>)/공기측 환 높이(H<sub>a</sub>), 가로방향 홀의 개수, 세로방향 홀의 개수, plate의 두께(t)를 설계인자로 선택하였다. 설계 인자 변화에 따른 열전달 효율, 압력강하, 제작의 난이도 등을 비교하여 제한 조건에서의 최적 설계를 도출하였다.

## 2.2 열전달 및 압력강하 해석

세라믹 열교환기의 온도 분포를 알기 위해선 열전달 해석이 이루어져야 한다. 대류 열전달 계수 h는 다음과 같이 경험적인 방법에 의해 계산된다. 먼저 유체 유동이 층류와 난류인 경우로 분류하여 Nusselt number를 계산한다.<sup>3)</sup>

층류유동(Re<sub>D</sub><2300) :

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

난류유동(Re<sub>D</sub>>2300) :

$$Nu = \frac{f/8(Re_D - 1000)Pr}{1 + 1.27\sqrt{f/8}(Pr^{2/3} - 1)} [1 + (D_h/L)^{2/3}]$$

난류유동에서 쓰이는 마찰계수 f는 다음과 같은 경험식으로 계산한다.<sup>4)</sup>

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

본 논문에서는 성능을 열교환기 성능 해석 방법(ε-Ntu 방법)으로 평가하였다.<sup>6)</sup>

$$\epsilon = 1 - \exp\left\{ \frac{N_{tu}^{0.22}}{R_c} [\exp(-R_c N_{tu}^{0.78}) - 1] \right\}$$

여기서 유용도(ε)식은 단일 통로 직교류에서 비 혼합유체일 경우 사용된다.

압력손실은 세라믹 열교환기의 입구와 출구사이에서 돌연축소, 유로마찰, 돌연확대를 고려하여 구하게 된다.<sup>5)</sup>

$$\Delta P = \Delta P_{in} + \Delta P_{core} - \Delta P_{out}$$

$\Delta P$ 는 총 압력강하,  $\Delta P_{in}$ 는 입구에서의 돌연축소에 대한 압력강하,  $\Delta P_{core}$ 는 중심부에서의 압력강하,  $\Delta P_{out}$ 은 출구에서의 돌연확대에 대한 압력강하이다.<sup>(7)</sup>

$$\Delta P_{in} = \frac{1}{2} \rho_1 V_1^2 \left[ 1 - \left( \frac{A_c}{A_{fr}} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} \rho_1 V_1^2 K_c$$

$$\Delta P_{out} = \frac{1}{2} \rho_2 V_2^2 \left[ 1 - \left( \frac{A_c}{A_{fr}} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} \rho_2 V_2^2 K_e$$

$K_c$ 와  $K_e$ 는 실험에 의해 결정된 값을 사용하게 된다.<sup>(7)</sup>

$$\Delta P_{core} = f \frac{1}{2} \rho_m V_m^2 (L/D_h) + (\rho_2 V_2^2 - \rho_1 V_1^2)$$

본 해석에서 연료는 메탄을 사용하며, 유량을 0.01 kg/s, 과잉 공기비를 1.1로 한다. 또한 공기의 입구 온도와 고온 배기가스의 입구온도는 각각 500℃와 1200℃로 하였다. 이는 3-pass일 경우를 감안하여 공기의 예상온도를 선정한 것이다.

### 2.3 CFD 유동해석

최적 설계를 위해선 세라믹 구조체의 온도구배에 따른 열응력에 대한 검토가 요구되며, 이론 해석만으로는 분포를 예측하기가 어렵다. 이에 CFD 유동해석 방법을 사용하여 온도분포를 파악하고자 하였다.

유체 유동해석이 가능한 CFD 상용 코드인 FLUENT 6.2를 사용하였으며, 정상상태, k-epsilon standard 모델을 적용하여 세라믹 core의 온도구배를 해석하였다.<sup>(8)</sup>

해석 모델 형상은 Fig.4에 나타냈으며, module layer가 반복 적층되어 있으므로 해석 시 반복 경계 조건을 적용하여 해석하였다. 각 layer는 동일한 조건으로 작동한다고 가정한다.

모든 조건을 이론해석과 동일하게 설정함으로써 이론 설계의 결과와 비교하여, 타당성을 검증하였다.

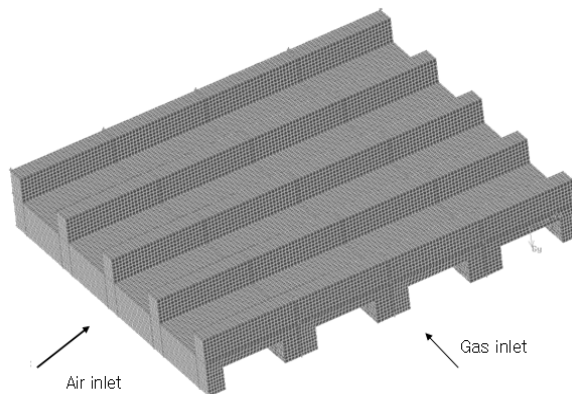


Fig.4 Geometry of CFD analysis

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 설계인자 선정

최적의 설계 인자를 선정하기 위해 하나의 설계 인자에 대한 열전달 효율, 압력강하, 제작의 난이도의 변화를 비교하였다. 선정된 각각의 최적 설계인자는 상호보완을 거쳐 최종 설계에 사용된다.

Fig.5 ~ Fig.6 에 나타낸 각 설계인자들은 열교환기의 형상이 바뀌면서 유체의 유입속도가 변하기 때문에 압력강하에 영향을 미치나, 체적당 열전달율( $\dot{Q}/V$ )에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 압력강하는 속도의 제곱에 비례하며, 설계인자의 변화에 속도가 변하면서 압력이 영향을 받는 것이다.

Fig.5 에 나타난 결과에서 보는바와 같이  $\dot{Q}/V$ 는 큰 영향이 없으며, 압력강하 역시 Hg/Ha 비율이 1 이상일 경우 큰 영향이 없는 것으로 나왔다. layer단위로 세라믹 모듈을 제작한다는 점을 고려한다면, Hg/Ha 비율을 1 로 설계하는 것이 적절할 것으로 보인다.

Fig.6 에서는 흰 간거리가 흰의 두께보다 3배 이상 커질 경우 압력강하는 크게 감소하게 된다. 이는 유체가 지나는 홀의 크기가 증가하면서 압력손실이 작아지기 때문이다. 하지만 흰의 두께가 5mm 미만으로 되면 제작상의 문제가 발생할 수 있으므로 3 ~ 4 배미만으로 설계하는 것이 적절하다.

Fig.7 은 교환기의 너비 방향의 홀의 개수를 5개 씩 증가시켰을 경우이며, 일정한 비율로 압력강하가 상승함을 보여 주고 있다. 이는 제한된 모듈 크기에서 홀의 개수를 증가시키면 홀의 크기가 감소하면서 압력손실이 증가하기 때문이다. 이에 따라 경제적인 측면을 고려하여 너비 방향의 홀의 개수는 5 개미만으로 설계하는 것이 경제적 측면을 고려했을 경우 적절할 것으로 사료된다.

Fig.8 에 나타낸 높이 방향의 홀 개수 변화는 너비 방향의 홀 개수 변화보다 압력손실이 급변하는 경향을 보여준다. 구조에서 가스와 공기층 통로가 교대로 적층되는 방법을 사용하기 때문이다. 그래프에 나타난 결과로 부터 높이 방향의 홀 개수는 4개미만으로 설정하는 것이 적절하다.

마지막으로 판(plate)의 두께에 따른 압력손실 및 열전달율 결과는 Fig.9 에 나타내었다. 판(plate) 두께 역시 앞서 언급한 높이 방향의 홀 개수 변화와 비슷한 결과를 보여주고 있다. 판(plate) 두께는 얇을수록 좋은 결과를 나타내지만 제작의 난이도를 고려하여 5 ~ 6 mm 범위에서 결정하였다.

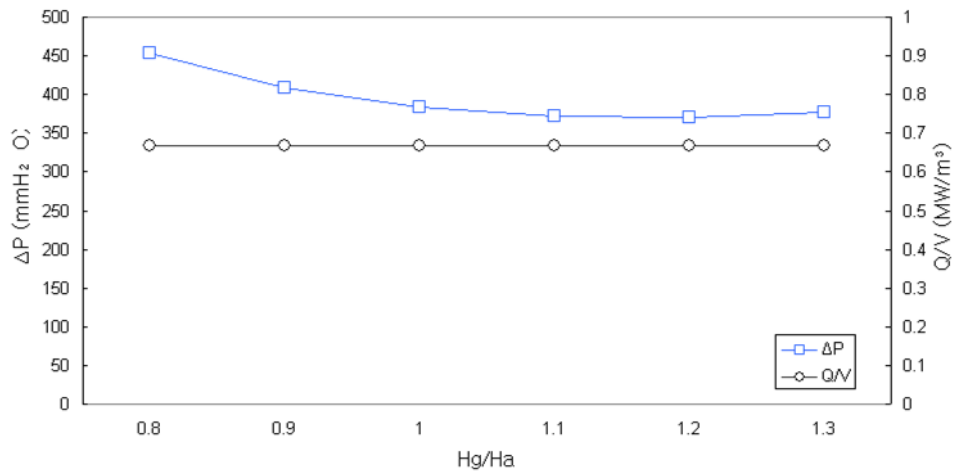


Fig.5 The parameter change by Hg/Ha

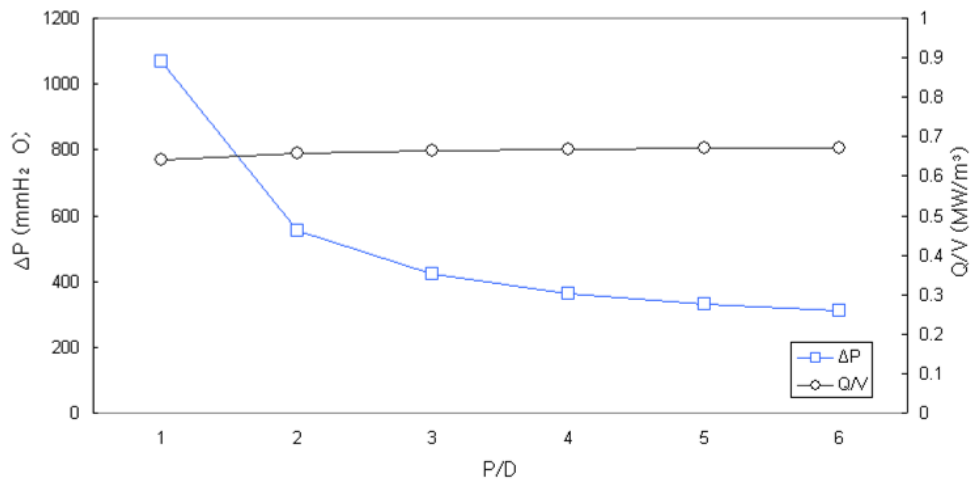


Fig.6 The parameter change by P/D

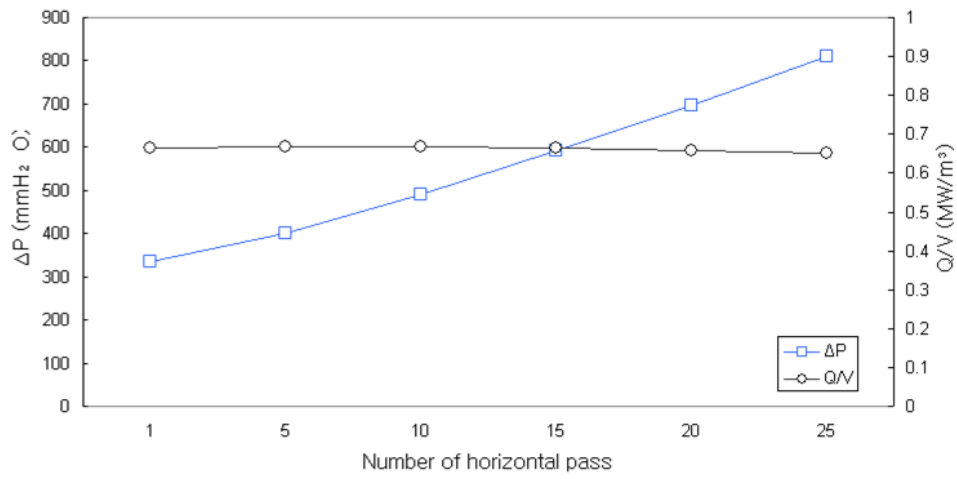


Fig.7 The parameter change by number of horizontal pass

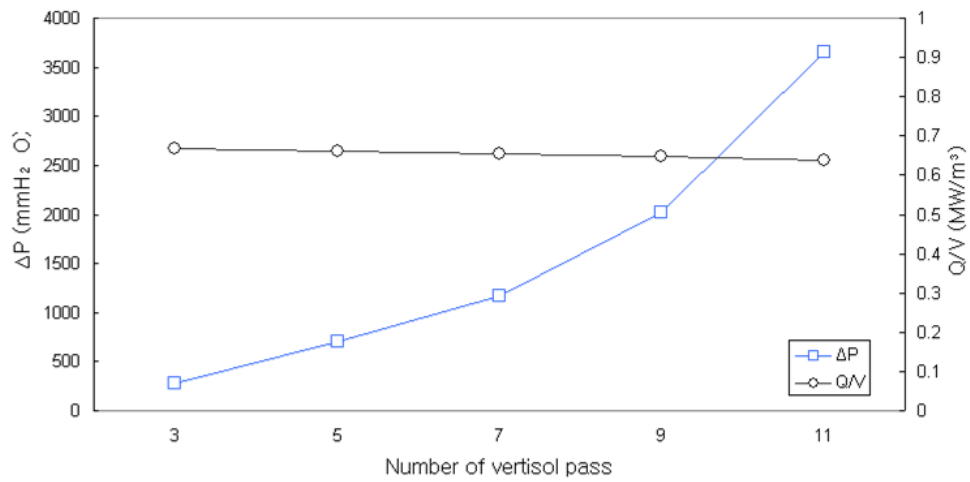


Fig.8 The parameter change by number of vertical pass

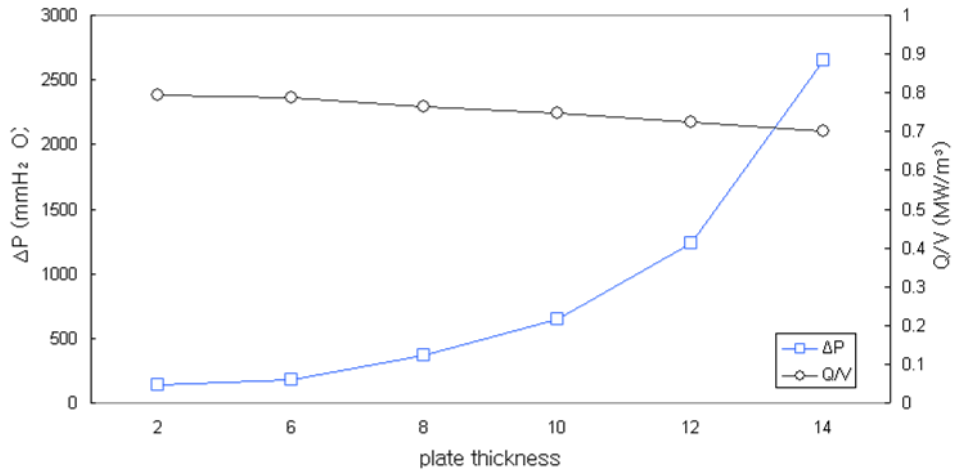


Fig.9 The parameter change by plate thickness

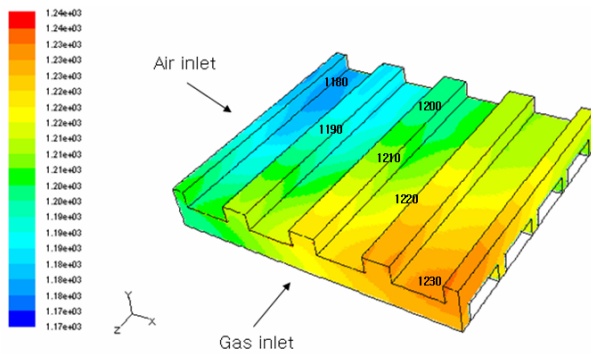


Fig.10 Temperature gradient in the ceramic core

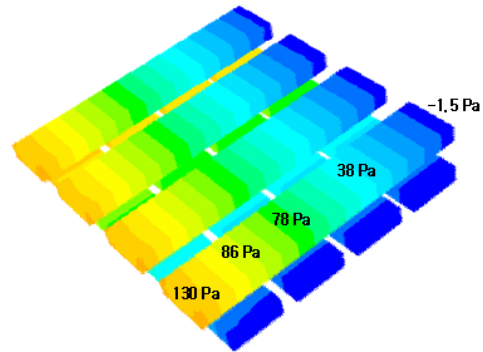


Fig.11 Pressure drop in the ceramic hole

### 3.2 CFD 해석

Fig.10 에 나타난 바와 같이 세라믹 구조물의 온도분포는 구조물의 대각선을 기준으로 구배를 형성하고 있으며, 각각 공기가 유입되고, 배출되는 벽면에서 온도구배가 가장 크게 형성되었다. 또한 구조물의 중심은 상대적으로 온도구배가 적게 나타남을 확인할 수 있었다. 하지만 전체적으로 온도구배가  $50 \text{ K} / 20 \text{ cm} = 2.5 \text{ K/cm}$  로서 세라믹의 한계 열응력에 비해 적은 변화가 일어나므로 온도구배 변화를 고려한 설계조건은 무시하여도 좋다.

Fig.11 에서 보듯이 세라믹 유로내의 압력손실은 약  $13.2 \text{ mmH}_2\text{O}$ 로 매우 작은 것으로 나타났다. 이는 세라믹 홀 입구의 형태에 따라서 압력강하가 결정됨을 의미하며, 세라믹 설계시 유로의 돌연 축소에 따른 압력강하에 대한 고려가 필요한 것으로 보여 진다.

여기서 이론해석과 CFD해석을 비교함으로써 설계결과를 확인하였다. 이론해석 결과 온도구배  $4.5 \text{ K/cm}$ ,  $\Delta T_g : 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_a : 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 이며, CFD해석 결과 온도구배  $2.5 \text{ K/cm}$ ,  $\Delta T_g : 26 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_a : 32 \text{ }^\circ\text{C}$ 이다.

### 4. 결론

세라믹의 특성을 고려한 최적설계 결과는 Table 1 에 나타내었다. 설계조건은  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  크기의 matrix 형태이며, 세라믹의 최소 두께를  $5 \text{ mm}$ 로 제한되었다.

Calculation of design parameters						
parameter	H <sub>g</sub>	H <sub>a</sub>	P	horizontal pass	vertisol pass	plate thickness
value	26 mm	26 mm	37 mm	4 EA	3 EA	6 mm
Calculation						
value	$\dot{Q} / V$ (MW/m <sup>3</sup> )		pressure drop in hole (mmH <sub>2</sub> O)		temperature gradient (°C/cm)	
	theory	CFD	theory	CFD	theory	CFD
	0.766	0.765	15	13.5	4.5	2.5

Table 1 The calculation of parameters

제작과 생산단가를 고려하여 가스방향과 공기방향의 세라믹 layer를 동일한 형태로 한다는 점도 설계에선 단점으로 작용하였다.

현재 세라믹은 열전도 계수가 170 W/mK으로 높다는 전제하에 설계되었다는 점에서 효율이 좋다고는 볼 수 없다. 이는 단순한 형태의 흰 구조에서 비롯된 것이며, 이를 개선하기 위해선 금속 열교환기에 사용되고 있는 Off-set fin 방식이나 평판형 구조로 cross-flow방식이 아닌 counter-flow방식을 통한 열전달 개선이 필요한 것으로 보인다.

이를 해소하기 위한 방안의 모색이 요구되며, 이러한 세라믹 열교환기의 효율 개선, 성형 기술의 한계를 벗어나기 위한 형상설계 등에 관한 지속적인 연구가 진행되어야 한다.

## 후기

이 연구는 에너지관리공단 에너지·자원기술개발사업(과제번호 : 2007-M-CC-12-P-12-0-000-2007) 지원으로 수행되었습니다.

## 5. 참고문헌

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, Karaman Institute for Fluid Dynamics, 1991
3. Spalding D. B. Heat Exchanger Design Handbook, Hemisphere Publishing Corporation, 1983
4. Incropera F. P. & Dewitt D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, 1990
5. Ramesh K. Shah ; Dusan P. Sekulic. Fundamentals of Heat Exchanger Design, John Wiley & Sons, 2002
6. 박용환; 강영구; 김흥. 고온 세라믹 폐열회수장치의 안전성 향상 연구, 한국산업안전학회지, 1996, 12, 제 11권 제 4호
7. A.F.MILLS. Basic Heat & Mass Transfer, 2nd Edition, Pearson, 2003
8. Fluent Inc. Fluent User's Guide, Volume 1, Fluent Inc, 2004