

배출가스 냉각장치 형상설계를 위한 수치해석

이석영[†]

인하공업전문대학 기계과

(2016년 8월 23일 접수, 2016년 10월 21일 수정, 2016년 10월 25일 채택)

Numerical Study for Configuration Design in the Exhaust Gas Cooling System

Suk Young Lee[†]

Department of Mechanical Engineering, Inha Technical College

(Received 23 August 2016, Revised 21 October 2016, Accepted 25 October 2016)

요 약

본 연구는 냉각효과를 높이기 위해 냉각채널 형상에 대한 변수를 다루고 있다. 냉각효과가 증가하면 제조현장에 있는 공장에 의해 발생하는 배출가스량은 감소하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 효율적인 냉각시스템에 대한 설계가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 냉각채널을 냉각성능을 향상시키기 위해 수치분석을 수행하였다. 배플과 핀의 길이에 영향을 받는 열전달률은 수치해석에 의해 계산이 된다. 3차원 레이놀즈 평균 나비아스토크 방정식이 유동과 냉각채널의 열전달을 계산하는데 사용되며 난류영역은 k-ε 모델이 사용되었다.

주요어 : 냉각시스템, 배출가스, 형상설계, 수치해석

Abstract - This paper deals with a parametric study on cooling channel configurations to enhance the cooling effect. As a cooling effect has been increased, the exhaust gas by the plant from a manufacture is becoming deceased. To solve this problem, the design of a efficient cooling system is needed. In this paper, the cooling channel was analyzed to improve the cooling performance. The heat transfer rates depending on the number of baffle and the height of fin were obtained by using numerical simulation method. Three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations were used to estimate flow and heat transfer in cooling channel, and the k-ε model for turbulence closure was employed.

Key words : Cooling system, Exhaust gas, Configuration design, Numerical analysis

1. 서 론

산업의 발전과 더불어 환경오염에 대한 중요성이 부각되면서 제조공장에서 생성되는 배출가스에 의한 대기오염에 대책을 지속적으로 마련되고 있다. 이러한 대기오염 방지기술 중에서 배출가스가 통과하여 유출되는 배기통로에 대한 냉각기술이 대두되고 있다. 공장내 설치된 연소부에서 생성되어 배출가스관을 통해

배출되는 배출가스의 온도가 고온이 되면 오염원이 급격하게 증가하여 외부 도심으로 방출된다. 따라서, 배출가스의 온도저감을 위해 배출가스관의 중간부위에 공기 또는 물로 냉각할 수 있는 장치를 부착하여 환경에 위배되는 물질을 저감시키는 방법이 적합한 방법 중 하나이다. 공장에서 배출되는 가스온도는 고온으로 유해성분을 다량으로 함유하게 되며 냉각기술은 이러한 유해성분을 온도저감을 통해 액화시키거나 배출가스 온도를 낮추어 화학적 동결과정에 감소를 기대할 수 있다. 냉각채널에 의한 유동장 및 열전달 특성을 알아보기 위한 연구들이 여러 연구자들에 의해

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : 032-870-2131 E-mail : sylee@inhac.ac.kr

수행되었다. Hwang 등⁽¹⁾은 채널과 돌출에 대해 실험적 연구를 수행하여 열전달 및 유동 특성을 비교하였다. 채널은 돌출에 비해 낮은 열전달 강화 효과를 나타내는 반면에, 낮은 압력 강하를 가진다고 보고하였다. Mahmood 와 Lignari⁽²⁾는 유동 가시화 실험을 통해 유로의 높이 변화에 따른 유동장 특성에 대해 연구하였다. 유로의 높이가 감소함에 따라 와류 생성이 더욱 활발하게 발생하고 이와 함께 열전달이 크게 증가함을 보였다. Ligrani 등⁽³⁾은 실험을 통해 배플의 내부 깊이 변화에 따른 영향을 연구하였으며, 깊이가 증가함에 따라 열전달 성능이 강화된다고 보고하였다. Elyyan 등⁽⁴⁾과 Isaev와 Leont'ev⁽⁵⁾는 냉각 유로에 대해 수치해석을 수행하였다. 배플 깊이가 깊어짐에 따라 열전달이 증가함을 보였으며, 특정한 배플 깊이에 도달하였을 때에 열전달 및 유동장 특성이 변한다고 보고하였다. Samad 등^{(6),(7)}은 앞선 연구를 바탕으로 배플의 지름, 길이 그리고 간격 변화를 변수로 하여 열전달과 압력 강하를 동시에 개선하기 위한 배플 형상의 최적화 연구를 수행하였다. 따라서, 본 연구에서는 공장에 설치된 배출가스 냉각장치 형상변화에 따른 냉각성능에 대한 수치해석을 상용 CFD 패키지를 이용한 3차원 전산 열유동 해석을 통해 분석하였으며, 냉각시스템 형상, 배플 사이 간격 및 개수, 냉각핀의 높이, 공·수냉 방식 등을 변수로 하여 해석 진행하였다.

2. 수치해석

2-1. 해석모델

본 연구에서는 공장에서 배출되는 고온가스가 냉각관 내부를 이동하는 것을 가정하여 냉각용 열교환기에 대해 형상 및 기타 변수에 따른 냉각에 대한 효율성을 분석하기 위해 공기의 열유동 해석에 필요한 Fig. 1과 같이 3D 모델링을 진행하였다. 수치해석에 사용된 틀은 ANSYS CFX v17.0을 사용하였고 자체 내장된 디자인모듈러에 의해 3D도면을 완성하였고, 정확한 계산을 위해 격자를 ANSYS 자체에 내장된 프로그램에 의해 격자를 생성한 결과, 노드수(Nodes)는 150만개 이상, 엘리먼트수(Elements)는 250만개 이상으로 정확한 계산이 되도록 준비하였다. Fig. 1은 수치해석의

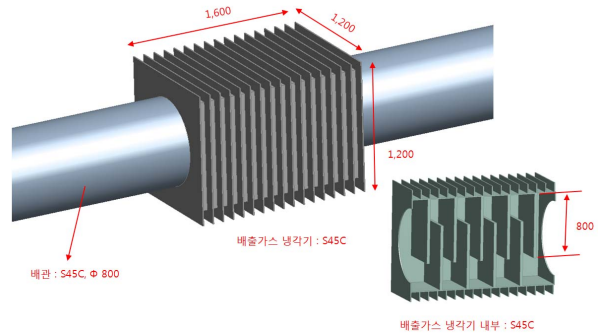


Fig. 1. Modeling of a cooling channel

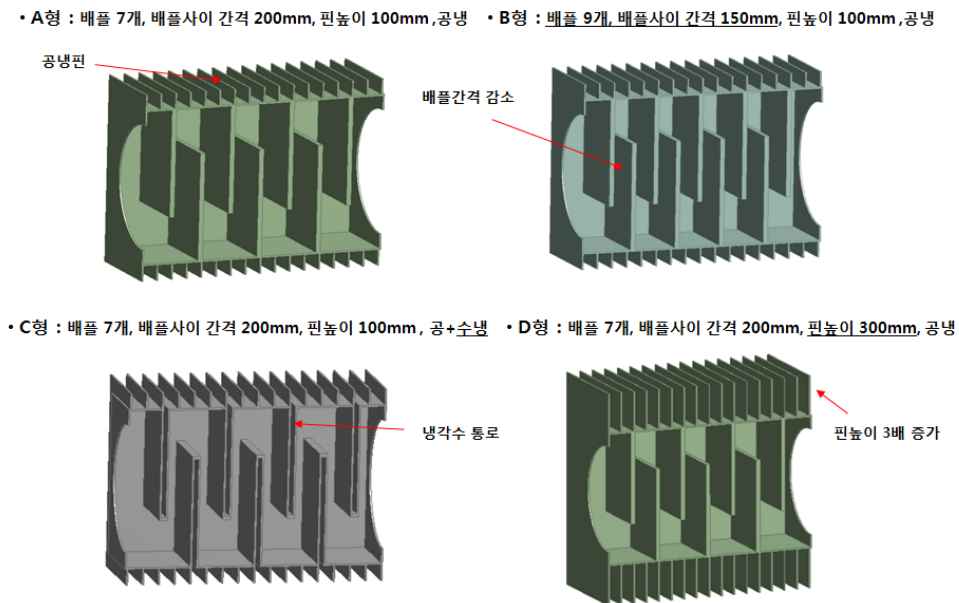


Fig. 2. Conditions for a numerical analysis

Table 1. Properties of exhaust gas

Item	Specification
Material	C ₈ H ₁₈
Molar mass	114.2kg/kmol
Crit. temp.	568K
Crit. pressure	24.9bar
Crit. volume	492cm ³ /mol
Boiling temp.	398K

Table 2. Boundary conditions for analysis

Case	Baffle Num.	Baffle gap (mm)	Fin height (mm)	Cooling method
A	7	200	100	Air(20℃)
B	9	150	100	Air(20℃)
C	7	200	100	Air(20℃)+Water(15℃)
D	7	200	300	Air(20℃)

※ Exhaust gas temp: 120℃, Inlet gas velocity: 10.9m/s

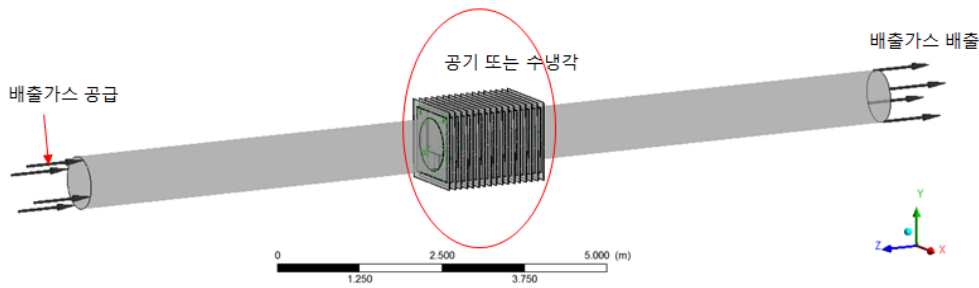


Fig. 3. Boundary conditions for analysis

대상으로 선정된 냉각용 열교환기의 모델링과정을 거친 형상을 나타내었고, 냉각용 열교환기의 형상 및 기타 변수 등에 따른 냉각성능을 파악하기 위해 Fig.2와 같이 4가지 조건으로 구분하여 진행하였다.

2-2. 수치해석 기법

해석 시간은 연속모드로 설정하였고 유동해석은 열전달을 고려하여 냉각용 열교환기 내부의 유속 분포와 온도분포를 분석하였다. 열교환기 내부의 유동은 비압축성, 난류, 점성유동으로 가정하였고 난류모델은 k-ε모델을 사용하였다. 작동유체는 배출가스가 VOC 증기인 점을 고려하여 Table 1과 같이 석유계 증기로 가정하였으며 열교환기 외부로의 열전달도 외부공기 조건과 함께 영향을 고려하였다.

2-3. 경계조건

배출가스 냉각기의 위치는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 배출관의 중앙부위에 위치하며 장치 내부로 고온의 배출가스를 지나가게 하면서 가스를 수냉 또는 공랭을 거쳐 냉각한 후 시스템 외부로 배출시키는 역할을 한다. 수치해석에서 공장에서 배출되는 120℃ 정도 고온가스가 냉각관 내부를 10.9m/s으로 이동하는 것을 가정하였으며 해석조건을 Table 2와 같이 4가지로

구분하여 진행하였고 Steady Mode로 해석을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 수치해석 결과 분석

배출가스 공급 속도 10.9m/s, 공기냉각 온도 20℃, 수냉각 온도 15℃를 기준하여 냉각시스템 형상, 배플 사이 간격 및 개수, 냉각핀의 높이, 공·수냉 방식을 변수로 하여 해석 진행하였다. 먼저, Fig. 4에서 보면, 배출가스가 냉각기를 지나면서 유체의 흐름을 연결한 유선의 경우 배플 사이의 간격이 작을수록 유선이 부드럽지 못한 현상을 보여주고 있는데 이는 유체저항이 증가됨을 예견할 수 있다. 이러한 결과는 배플 사이 간격이 작은 Case B의 경우 입·출구간의 압력차가 가장 크게 나타남을 확인하는 과정에서도 비슷한 현상이라고 판단할 수 있다. Fig. 5는 배출가스에 의해 형성되는 유동의 움직임 벡터를 표시한 것이며, 냉각기내의 속도벡터의 크기는 배플 간격이 작은 장치가 가장 크게 나타나는데, 이는 배플이 증가함에 따라 유로 단면적이 감소하여 나타난 결과라고 판단된다. Fig. 6은 배출가스가 냉각기를 지나면서 냉각에 의해 온도가 감소하는 현상을 보여주고 있으며 공냉과 수

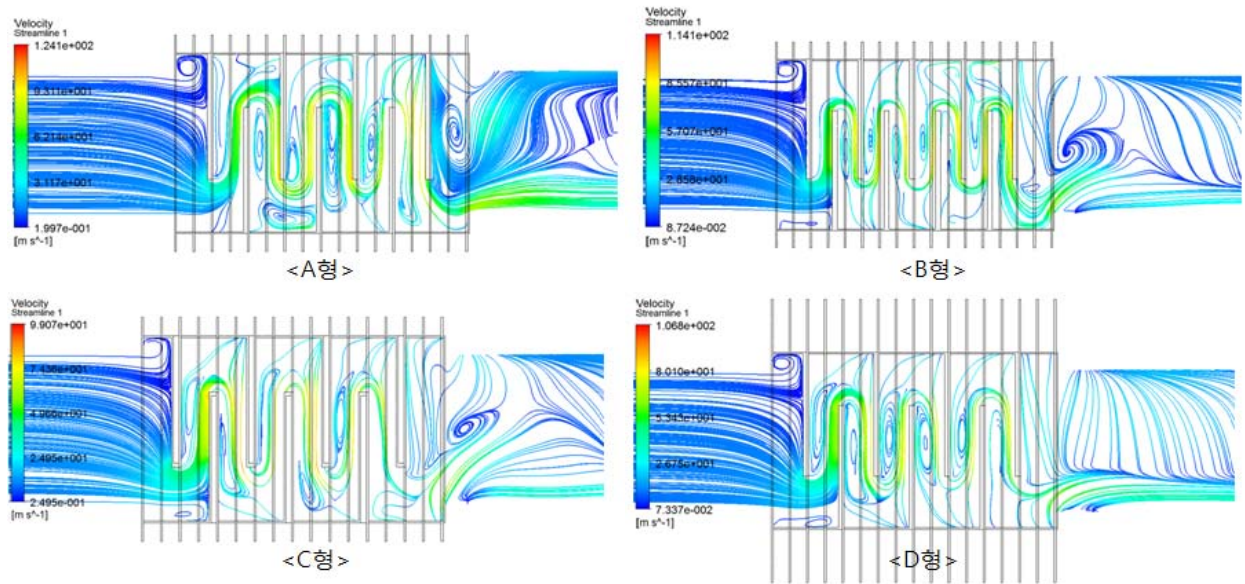


Fig. 4. Distribution of calculated exhaust gas streamline in cooling system

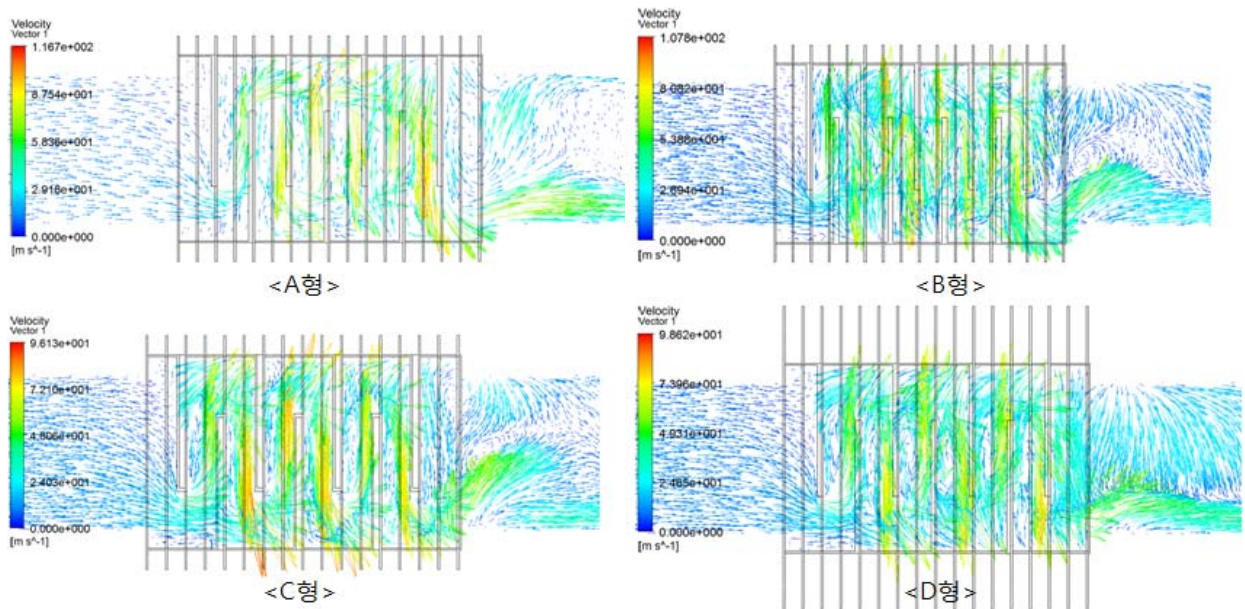


Fig. 5. Distribution of calculated exhaust gas vector in cooling system

냉각 병용으로 적용한 Case C가 Table 3에서 보는 바와 같이 입출구 사이 배출가스 온도차이가 압도적으로 크게 나타남을 알 수 있고, 핀의 높이를 증가시킨 Case D의 경우도 냉각효과가 증가됨을 알 수 있었다. 또한, 배출가스가 냉각기를 지나면서 배플 등의 구조물에 의한 유체저항으로 나타나는 압력을 Fig 7.에서 보면 배플 간격 가장 작은 Case B의 경우가 배압이 가장 크게 나타났고 공기와 수냉각을 병용한 Case C의 경

Table 3. Numerical analysis results

Case	Diff. temp. (°C)	Diff. pressure (Pa)	Rank
A	22.6	13165.8	4
B	23.4	18537.4	3
C	32.5	13621.2	1
D	25.7	13171.3	2

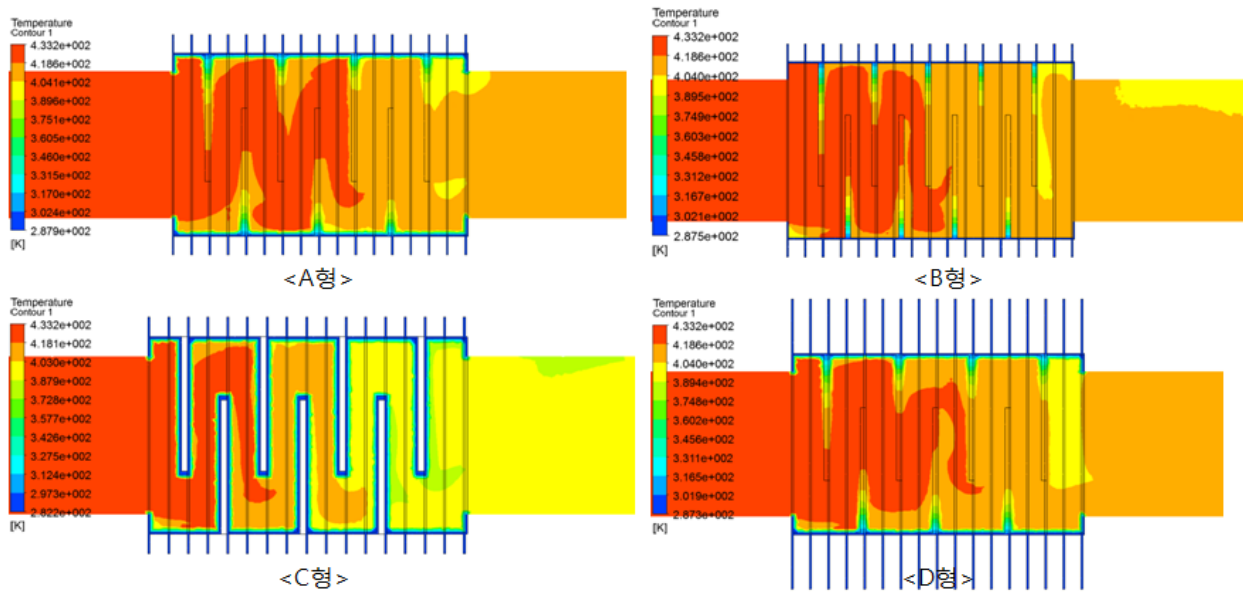


Fig. 6. Distribution of calculated exhaust gas temperature in cooling system

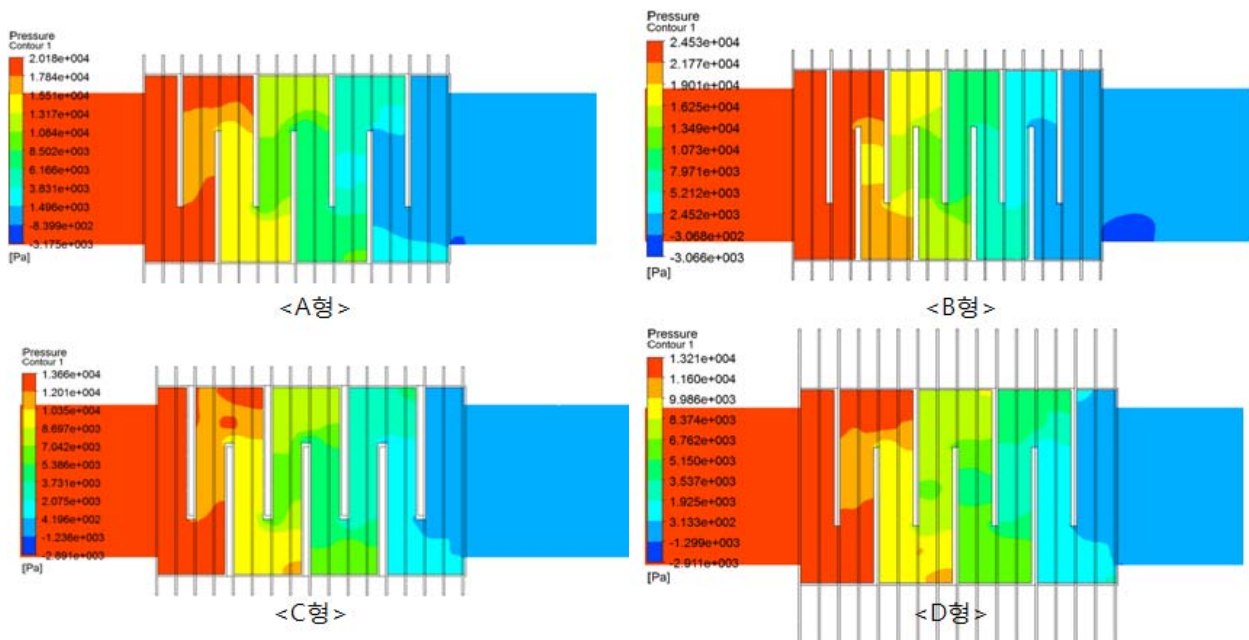


Fig. 7. Distribution of calculated exhaust gas pressure in cooling system

우도 약간 증가함을 알 수 있다. 따라서, 배플 간격의 감소는 냉각효과를 약간 높이는 하지만 배압을 증가시키는 원인이 되는 상관관계(trade-off)라고 볼수 있으며, 냉각의 효과를 크게 기대하기 위해서는 공랭식과 더불어 수냉식으로 병용해서 제작하는 방안을 검토하고 핀의 높이를 증가시키는 것도 바람직하다고 판단된다.

3-2. 수치해석 결과 검증

해석결과는 Case C가 가장 냉각효율이 좋은 냉각 시스템으로 입증되었으나 공냉과 수냉의 기능을 제작해야 하는 번거로움이 있어 공냉기능만을 가진 냉각시스템 중에서 비교적 제작하기 어렵지 않은 Case A를 Fig. 8과 같이 제작하여 수치해석에서 가정하였던 동일한 조건으로 실험을 수행하였다. 실험횟수는 10회를



Fig. 8. Experimental apparatus

기준으로 하였으며 검증은 평균값을 기준으로 비교 평가하였다. 실험결과는 배출가스 입·출구부의 온도와 압력차가 각각 20.1℃, 11,038Pa로 측정되어 해석에 의해서 계산된 값과 거의 유사한 결과로서 수치해석의 타당성을 검증하였다.

4. 결론

배출가스 냉각시스템의 최적화 설계를 위해 상용 프로그램인 ANSYS v17.0을 사용하여 냉각시스템 형상에 따른 4가지 조건으로 시뮬레이션을 수행하여 냉각효율을 향상시킬 수 있는 방안을 찾도록 하였다.

(1) 해석결과, 냉각효과는 Case C의 형상이 배출가스 입출구 온도차가 32.5℃로서 가장 양호하였다.

(2) 배플 간격 감소는 냉각효과를 약간 증가시키는 는 하지만 배압을 증가시키는 원인이 된다고 볼수 있으며, 냉각의 효과를 크게 증대시키기 위해서는 수냉식으로 검토하고 핀의 높이를 증가시키는 것이 바람직하다고 판단된다.

(3) 해석결과를 검증하기 위하여 Case A형상에 대하여 수치해석과 동일한 조건에서 실험을 수행한 결과 배출가스 입·출구부의 온도와 압력차가 각각 20.1℃, 11,038Pa로 측정되어 해석에 의해서 계산된 값과 거의 유사함을 확인하였다.

References

1. Hwang, S. D., Kwon, H. G. and Cho, H. H., 2008,

Heat transfer with dimple/protrusion arrays in a rectangular duct with a low Reynolds number range, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, pp. 916-926

2. Mahmood, G. I. and Ligrani, P. M., 2002, Heat transfer in a dimpled channel: combined influences of aspect ratio, temperature ratio, Reynolds number, and flow structure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 2011-2020

3. Ligrani, P. M., et al., 2001, Flow structure and local Nusselt number variations in a channel with dimples and protrusion on opposite walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 4413-4425

4. Elyyan, M. A., Rozati, A. and Tafti, D. K., 2008, Investigation of dimpled fins for heat transfer enhancement in compact heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 2950-2966

5. Isaev, S. A. and Leont, A. I., 2003, Numerical simulation of vortex enhancement of heat transfer under conditions of turbulent flow past a spherical dimple on the wall of a narrow channel, *High Temperature*, Vol. 44, pp. 665-679

6. Samad, A., Lee, K. D. and Kim, K. Y., 2008, Multiobjective optimization of a dimpled channel for heat transfer augmentation, *Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 207-217

7. Kim, H. M., Moon, M. A. and Kim, K. Y., 2012, Heat-transfer analysis of a cooling channel with inclined elliptical dimples, *Journal of Computational Fluids Engineering* Vol. 17, No. 3, pp.1-7