

반응표면법을 이용한 Cooling Air Cooler 열교환기의 최적 설계 Optimum Design of a Cooling Air Cooler Heat Exchanger by Using a Response Surface Method

김성수* · 정효민**† · 정한식***

Seong-Soo Kim*, Hyo-Min Jeong**† and Han-Shik Chung***

(Received 30 March 2017, Revision received 20 April 2017, Accepted 20 April 2017)

Abstract: Global air traffic is forecast to grow at an average annual rate of around 5% in the next 20 years. The continuous growth of air traffic and raised environmental awareness put increasing pressure on aero engine manufacturers to reduce fuel burn and emissions. NEWAC are a new integrated program of the European Union with focus on innovative core engine concepts to achieve this problem. In this paper, Within NEWAC, active core engine configurations will be investigated. the investigation is focused on the optimal design of the CAC heat exchanger for active core. For optimal design of the CAC heat exchanger, the HTFS of basic design of heat exchanger are analyzed so as to proceed an optimization routines based on Response Surface Method(RSM) and Design of Experiment(DOE). As a result, CAC heat exchanger optimized by 1.0314 lb/s mass flow rate and 3.9058 mm TP of tube layout and 206.8181 mm height of heat exchanger and 918 tube number for heat transfer and pressure drop. We confirm the design optimization using RSM and DOE is useful on complex structure of heat exchanger.

Key Words : Cooling Air Cooler Heat Exchanger, Design of Experiment, Response Surface Methodology, Central Composite Method

1. 서 론

발전용이나 선박 및 차량용 등 각종 사업용 가스 터빈은 경량, 고성능화를 주로 추구하는 항공기 용과는 달리 효율 제고가 가장 큰 관건으로 다양한 방법에 의해 시스템의 고효율화가 이루어지고

있다. 즉 압축기, 연소기 및 터빈 등 각 부품의 성능 개선이나 터빈 입구 온도를 높이기 위한 세라믹 재료 응용 연구 등이 유럽이나 미국 등에서 매우 활발히 이루어지고 있다. 그러나 이러한 방법에 의한 효율 제고는 압력이나 열에 견딜 수 있는 재료에 의해 제한을 받게 되므로 Reheater 및

**† 정효민(교신저자) : 경상대학교 에너지기계공학과
E-mail : hmjeong@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-9114

*김성수 : 경상대학교 에너지기계공학과

***정한식 : 경상대학교 에너지기계공학과

**† Hyo-Min Jeong(corresponding author) : Department of Energy and Mechanical Engineering, Gyeongsang National University.

E-mail : hmjeong@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-9114

*Seong-Soo Kim : Department of Energy and Mechanical Engineering, Gyeongsang National University.

***Han-Shik Chung : Department of Energy and Mechanical Engineering, Gyeongsang National University.

Recuperator 와 같은 열교환기를 사용하여 Cycle을 개선함으로써 효율을 향상시키는 시스템 개발이 또한 많이 이루어지고 있다.¹⁻³⁾

Advisory council for aerospace research in europe(ACARE)는 2020년까지 항공기 엔진의 배기가스에서 이산화탄소 20%, 질소산화물 80% 그리고 소음을 절반으로 줄이는 환경 목표를 제시하고 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해서 NEWAC(New aero engine core concept) 프로젝트는 차세대 항공기 엔진에 탑재할 친환경, 고효율 Reheater 및 Intercooler 개발을 진행하고 있고 동시에 비연료소비량(Specific fuel consumption)을 감소시키는 연구를 진행하고 있다.⁴⁾

최근 항공기용 열교환기의 발달은 독일 회사인 MTU에 의해 두드러지고 있다. MTU는 CLEAN 프로그램을 통하여 튜브형 열교환기로 이용하여 항공기용 터빈엔진에 Intercooler와 Recuperator를 적용시킴으로써 이산화탄소 배출량 6%, 질소산화물 16%를 감소시키는 결과가 발표되었다.⁵⁾

러시아의 AL-31F 엔진은 1970년대 중반에 전투기용으로 개발된 엔진으로서 미세 튜브형 열교환기가 적용이 되었다. 하지만 민간 항공기 엔진으로는 미세 튜브형 열교환기가 적용된 적이 없다. 그러므로 민간 항공기 엔진에 미세 튜브형 열교환기를 적용하기 위해서는 보다 많은 연구가 필요하다.^{6,7)}

항공기 엔진 적용되는 열교환기의 경우 높은 압력에서 작동되기 때문에 항공기에 많이 적용되고 있는 PFHE(Plate fin heat rxchanger)은 부적합하다. 일반적으로 고압 조건에서 많은 Tubular type 열교환기는 신뢰성을 갖지만, 직접도(Heat transfer area density)가 100 m²/m³ 이하로 단위체적당 전열면적 작다. 이러한 단점을 해결하고자 미세 튜브(외경 1.5 mm)를 적용한Tubular type의 열교환기를 항공기 엔진용에 적용하고자 한다.

본 연구에서는 열교환기의 열효율 및 압력강하에 영향을 미치는 주요 설계인자를 완전요인배치법(Full factorial design)을 활용하여 선정하였다. 그리고 실험설계법(DOE:Design of experiment)을 통하여 반응표면법(RSM: Response surface methodology)

을 생성한 후 최적화 기법을 사용하여 열교환기의 최적화를 수행하였다.

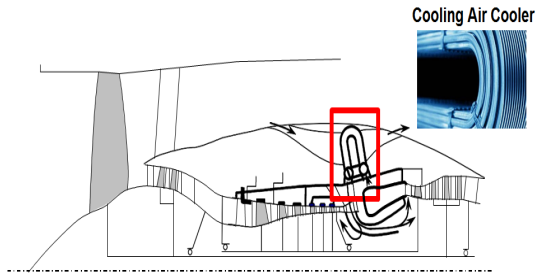


Fig. 1 Active Core concept

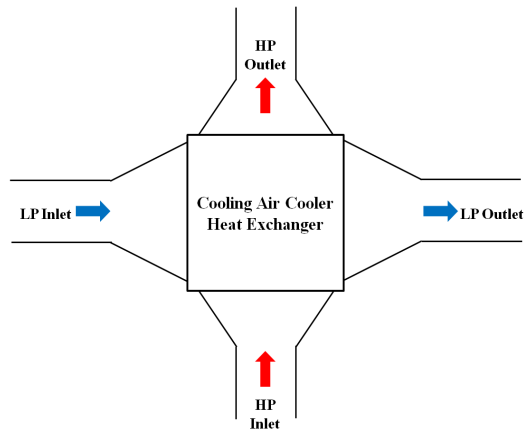


Fig. 2 Heat exchanger schematics

Table 1 Boundary condition & requirements

Boundary Condition		
Parameter	Tube Side	Shell Side
Fluids	Air	Air
Inlet pressure (bar a)	55.88	1.54
Inlet Temperature (K)	992	349
Mass Flow Rate (lb/s)	1.405	minimum
Requirements		
Outlet Temperature (K)	692	Free
Pressure Drop (Pa)	20.63	0.72

2. RSM를 이용한 최적 설계 방법

2.1 열교환기 설계 목표

Tubular type 열교환기의 설계 목표를 선정하기 위해 Fig. 1과 같이 NEWAC 프로젝트에서 제시하고 있는 Active core⁸⁻¹⁰의 열교환기를 설계하고자 한다. Fig. 2는 Active core에 적용되는 CAC(cooling air cooler) 열교환기 개략도이며, Tube 측에는 고온고압의 공기가 흐르고 Shell 측에 저온저압의 공기가 흐른다. 유동패턴은 Cross flow이며, CAC 열교환기를 설계하기 위한 운전 조건 및 요구 조건은 Table 1과 같다.

2.2 최적화 과정

열교환기의 최적화를 위해서는 설계인자(변수)와 목적함수를 결정하여야 한다. 이 연구에서는 Tube 측의 출구 온도 및 압력강하, Shell 측의 압력강하를 목적함수로 선정하였으며, Table 1의 요구조건에 만족하는 CAC 열교환기를 설계하고자 한다.

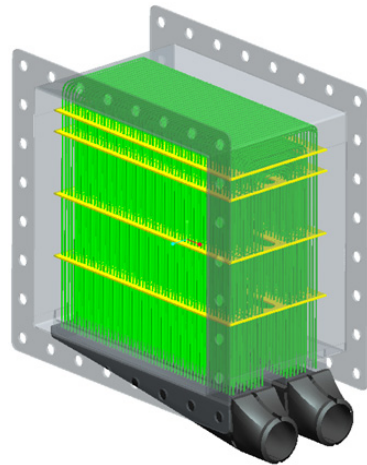
목적함수에 영향을 미치는 설계인자로는 Fig. 3과 같이 Tube의 수량, Tube layout(TP, LP), Tube bundle의 길이, 높이, 폭 및 Shell 측의 유량으로 결정할 수 있다. Tube bundle의 길이의 경우, Tube layout의 TP와 Tube 수량으로 결정되어 이를 설계인자로 결정하였지만, Tube bundle의 폭의 경우 소형화 및 제작성을 고려하여 LP를 3.72 mm, 1열의 Tube 수량을 9개로 고정하였다. 그리고 Tubular type 열교환기의 단점인 직접도 높이기 위해 정해진 체적에 전열면적을 극대화시킬 수 있도록 위해 Tube 외경을 1.5 mm로 고정하여 수량을 증가시켜 직접도를 높이는 방법을 택하였다.

설계인자 및 목적함수 설정 후 실험계획법(DOE)을 통해 효율적으로 실험을 할 수 있는 실험점들을 Table 2와 같이 상향 값과 하향 값을 선정하였다.

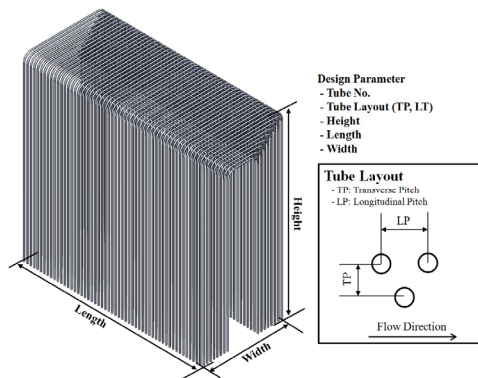
열교환기 전문 설계 프로그램으로인 HTFS(Heat transfer & fluid flow service)를 이용하여 설계를 진행하였다. 그 후 HTFS 결과를 이용하여 설계인자에 따른 목적함수 값을 근사적으로 표현하는 반응표면(Response surface)을 생성하였다.

Table 2 Range of each design parameter

Design Parameter	Unit	Range	
		Lower (Level -1)	Upper (Level 1)
TP (X_1)	mm	1.75	1.95
Tube No. (X_2)	ea	918	990
H (X_3)	mm	180	200
M_s (X_4)	lb/s	0.9	1.3



(a) CAC Heat Exchanger Concept



(b) Geomerty of Tube Bundle

Fig. 3 Geometry of CAC Heat Exchanger

2.3 설계인자의 영향성 조사

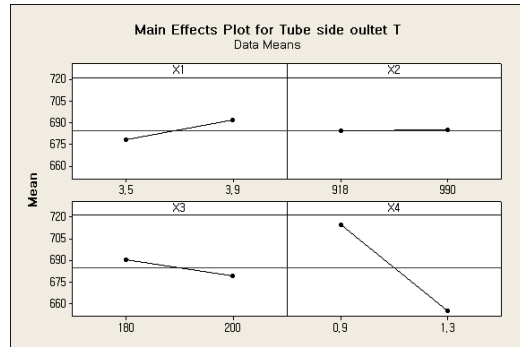
실험을 실시하기 이전에 실험에 대한 충분한 계획 없이는 소기의 목적을 달성하기가 어렵다.

실험계획법이란 실험에 대한 계획을 의미하는 것으로 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 하고, 데이터를 어떻게 취득하며 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하며 최소의 실험회수로 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라 정의할 수 있다. 그리고 실험에 있어서 목적함수 값에 영향을 준다고 생각되는 무수히 많은 원인들 중에서 실험에 직접적인 영향을 주는 원인을 인자(Factor)이라 하며 실험을 하기 위한 인자의 조건을 인자의 수준이라 한다. 따라서 설계인자 선정의 적절성을 판단하기 위해 4개의 인자로 하여 2수준의 레벨을 설정하여 $L_{16}(2^4)$ 로 직교배열표로 결정을 하였다.

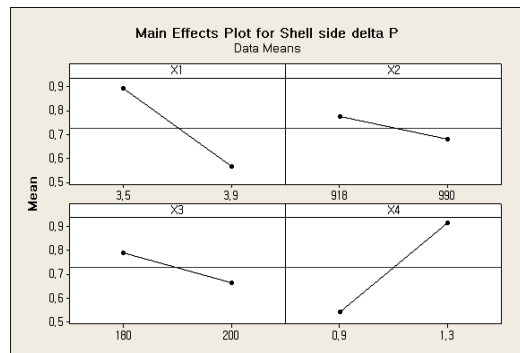
Table 3은 미니탭(Minitab)을 이용하여 설계인자 Tube layout의 TP(X_1), Tube(X_2) 수량, 높이(X_3), Shell 측의 유량(X_4)에 대하여 목적함수에 가장 영향을 많이 주는 설계 인자를 찾기 위한 직교배열표 (Orthogonal array) 및 그에 대한 결과이다.

Table 3 Orthogonal array with analysis results

	X_1	X_2	X_3	X_4	T_{TO}	ΔP_T	T_{SO}	ΔP_s
1	3.9	990	200	1.3	650.9	13.30	744.5	0.61
2	3.5	918	200	1.3	643.1	14.51	753.1	1.09
3	3.9	990	180	1.3	689.1	12.46	735.4	0.73
4	3.5	990	180	0.9	711.7	13.04	819.7	0.68
5	3.5	990	200	1.3	639.8	13.06	756.8	0.95
6	3.5	918	180	1.3	651.3	13.66	744.0	1.29
7	3.9	918	200	1.3	654.4	14.67	740.6	0.69
8	3.9	918	180	1.3	662.6	13.81	731.5	0.83
9	3.9	918	200	0.9	717.3	15.49	810.6	0.40
10	3.5	990	200	0.9	705.9	13.85	829.1	0.57
11	3.9	990	200	0.9	714.7	13.96	814.9	0.36
12	3.5	918	200	0.9	708.4	15.37	825.0	0.65
13	3.5	990	180	1.3	648.0	12.32	747.8	1.13
14	3.9	990	180	0.9	720.5	13.14	805.4	0.42
15	3.5	918	180	0.9	714.3	14.43	815.5	0.77
16	3.9	918	180	0.9	723.9	14.55	801.0	0.48



(a) Outlet Temperature of Tube Side



(b) Pressure drop of Shell Side

Fig. 4 Main effect analysis

Fig. 4는 Table 3으로부터 요인배치법을 이용하여 주효과 분석을 하였다. 주효과도는 변수의 각 수준의 적합평균을 선으로 표시하여 각 수준에 따른 영향력을 비교할 수 있다. 주효과도 그래프의 경우 기울기가 클수록 목적함수에 영향을 많이 미치는 것을 의미한다. (a)는 각 설계인자가 Tube측의 출구온도에 주효과도이고, X_4 , X_1 , X_3 , X_2 순서로 영향을 주는 것으로 알 수가 있었으며, (b)는 각 설계인자가 Shell측의 압력강화는 X_4 , X_1 , X_3 , X_2 순서로 영향을 주는 것으로 알 수가 있었다. 이 결과로부터 설계인자 선정에 대한 적절성을 판단할 수 있었다.

3. 반응표면분석 및 분산분석

반응표면법(Response surface Methodology)는 설

계인자와 목적함수의 실험적 관계를 수학적으로 표현하기 위해서 실험이나 시뮬레이션으로부터 얻은 치수들로부터 근사적 반응표면모델을 만들어내는 통계적 기법들을 의미한다.

반응표면모델을 생성하기 위해서는 실험계획을 세우고 이에 따라 실험을 수행하여야 한다. 실험 계획법에는 여러 종류가 있으나, 일반적으로 가장 많이 사용되고 최적화 방법에 통계학적으로 검증이 된 중심합성계획법(Central composite design)을 이용하였고, Full quadratic 모델 추정위해 2차 다항식을 이용하였다. 3차 이상의 모델을 추정을 하려면 실험횟수가 기하급수적으로 늘어나기 때문에 문제의 목적에 맞게 가능한 저차항 근사가 유리하다.

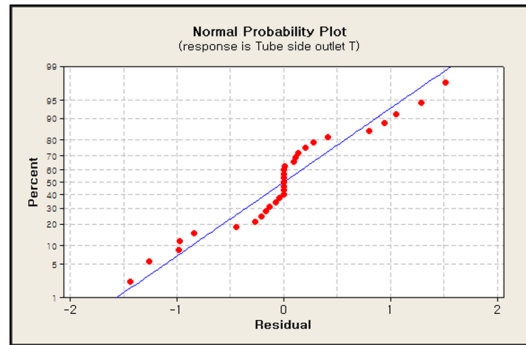
Table 4 Analysis Results

	X ₁ (X ₄)	X ₂ (X ₁)	X ₃ (X ₃)	X ₄ (X ₂)	Tube		Shell
					T _{out} (Y ₁)	ΔP (Y ₂)	ΔP (Y ₃)
1	-1	-1	-1	-1	713.6	14.1	0.74
2	1	-1	-1	-1	650.5	13.3	1.25
3	-1	1	-1	-1	722.5	14.2	0.46
4	1	1	-1	-1	661.7	13.4	0.80
5	-1	-1	1	1	707.8	15.0	0.63
6	1	-1	1	-1	642.3	14.1	1.05
7	-1	1	1	-1	716.6	15.1	0.39
8	1	1	1	-1	653.5	14.3	0.67
9	-1	-1	-1	1	712.3	13.4	0.70
10	1	-1	-1	1	648.8	12.6	1.17
11	-1	1	-1	1	721.2	13.5	0.44
12	1	1	-1	1	797.7	12.8	0.75
13	-1	-1	1	1	706.5	14.2	0.59
14	1	-1	1	1	640.6	13.4	0.98
15	-1	1	1	1	715.3	14.3	0.37
16	1	1	1	1	651.7	13.5	0.63
17	-2	0	0	0	756.8	14.7	0.37
18	2	0	0	0	627.2	13.2	1.08
19	0	-2	0	0	668.8	13.6	1.13
20	0	2	0	0	688.4	13.9	0.46
21	0	0	-2	0	687.7	13.0	0.82
22	0	0	2	0	673.3	14.6	0.58
23	0	0	0	-2	681.5	14.5	0.73
24	0	0	0	2	678.4	13.1	0.64
25	0	0	0	0	680.0	13.8	0.68

Estimated Regression Coefficients for Tube side outlet T

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	679.960	0.2970	2289.278	0.000
x1	-31.921	0.1604	-198.999	0.000
x2	4.972	0.1604	30.996	0.000
x3	-3.538	0.1604	-22.056	0.000
x4	-0.761	0.1604	-4.746	0.000
x1*x1	3.022	0.1470	20.564	0.000
x2*x2	-0.339	0.1470	-2.309	0.031
x3*x3	0.129	0.1470	0.881	0.388
x4*x4	0.012	0.1470	0.082	0.936

S = 0.785840 PRESS = 29.6242
R-Sq = 99.95% R-Sq(pred) = 99.88% R-Sq(adj) = 99.93%

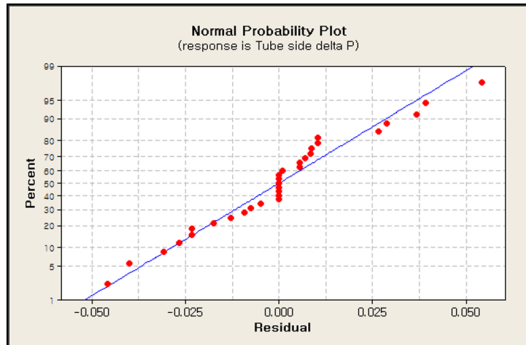


(a) Outlet Temperature of Tube Side

Estimated Regression Coefficients for Tube side delta P

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	13.7800	0.009840	1400.343	0.000
x1	-0.3779	0.005314	-71.111	0.000
x2	0.0637	0.005314	11.996	0.000
x3	0.4162	0.005314	78.324	0.000
x4	-0.3571	0.005314	-67.191	0.000
x1*x1	0.0393	0.004869	8.066	0.000
x2*x2	-0.0057	0.004869	-1.177	0.252
x3*x3	-0.0020	0.004869	-0.407	0.688
x4*x4	0.0068	0.004869	1.391	0.178

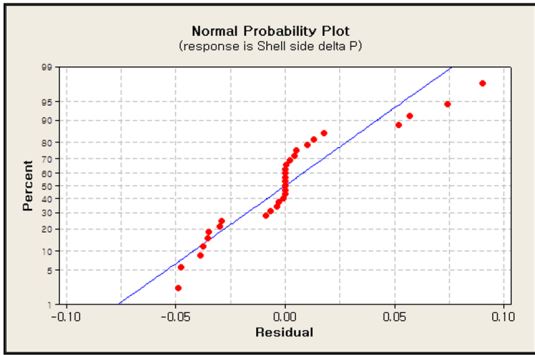
S = 0.0260354 PRESS = 0.0296068
R-Sq = 99.86% R-Sq(pred) = 99.73% R-Sq(adj) = 99.81%



(b) Pressure Drop of Tube Side

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.684000	0.014472	47.263	0.000
x1	0.183708	0.007816	23.504	0.000
x2	-0.164208	0.007816	-21.009	0.000
x3	-0.062208	0.007816	-7.959	0.000
x4	-0.022792	0.007816	-2.916	0.008
x1*x1	0.009594	0.007160	1.340	0.194
x2*x2	0.027594	0.007160	3.854	0.001
x3*x3	0.004094	0.007160	0.572	0.573
x4*x4	0.000344	0.007160	0.048	0.962

S = 0.0382901 PRESS = 0.0525096
 R-Sq = 98.01% R-Sq(pred) = 96.75% R-Sq(adj) = 97.28%



(c) Pressure Drop of Shell Side

Fig. 5 Analysis of variance

설계인자 4개에 대해 표면 반응을 이용한 최적 설계를 수행하였다. 설계인자가 4개이므로 중심합성계획법을 2차 추정을 위해서는 25번의 실험이 필요하다. Table 4에는 중심합성계획법에서 정해주는 25개의 실험 점과 X_4 , X_1 , X_3 , X_2 를 수치 크기에 대한 영향을 제거하기 위하여 각각을 단위 크기 Level -1 ~ Level 1로 환산해서 x_1 , x_2 , x_3 , x_4 라는 변수로 나타냈다. 그 옆에는 목적함수의 경우 열교환기 설계 프로그램 HTFS를 통하여 결과를 나타내었다.

반응표면모델을 생성하기 위해 실행한 실험이 적합도가 부적당하면 빈약하거나 잘못된 결과를 이끌 수 있으므로 신뢰성 검증이 필요하다. 회귀 분석 및 분산분석을 통하여 전체 모델에 어떻게 영향을 주는 지를 파악하기 위하여 분산분석 (ANOVA: Analysis of variance)를 수행하여 Fig. 5에 결과를 나타내었다. Fig. 5는 반응표면법 분석

을 이용하여서 각각의 목적인인 Tube 측의 출구 온도, 압력강화 및 Shell 측의 압력강화에 대하여 표준화 잔차를 보여주는 그림이다. 여기서 P의 값은 오차대비 효과의 크기를 나타내며, R-sq의 값은 %클수록 에러가 매우 작을 확률이라는 뜻한다. R-sq의 값이 95% 이상을 만족하면 신뢰성을 가진다.⁶⁾ Fig. 5로부터 Tube 측의 출구온도의 경우 99.9%, 압력강화의 경우 99.7%, Shell 측의 압력강화의 경우 96.8%의 값을 구함으로써 신뢰성을 검증하였다.

4. 중심합성계획법

실험설계법의 결과로부터 중심합성계획법을 진행하였다. 중심합성계획법을 결과를 바탕으로 2차 다항식을 최소제곱법을 이용하여 구하면 아래의 식과 같다. 식 (1)은 Tube 측의 출구 온도, 식 (2)는 Tube 측의 압력강화, 식 (3)은 Shell 측의 압력강화이다.

$$Y_1 = 926.80 - 325.82(x_1) + 87.63(x_2) - 0.85(x_3) - 0.11(x_4) + 75.55(x_1^2) - 8.48(x_2^2) + 0.001(x_3^2) + 3.70(x_4^2) \quad (1)$$

$$Y_2 = 43.23 - 4.05(x_1) + 1.38(x_2) + 0.05(x_3) - 0.06(x_4) + 0.98(x_1^2) - 0.14(x_2^2) - 1.98(x_3^2) + 0.00002(x_4^2) \quad (2)$$

$$Y_3 = 17.28 + 0.39(x_1) - 5.93(x_2) - 0.02(x_3) - 0.003(x_4) + 0.24(x_1^2) + 0.69(x_2^2) + 0.00004(x_3^2) + 0.000001(x_4^2) \quad (3)$$

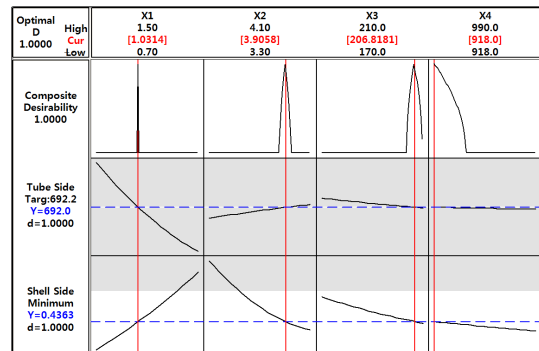


Fig. 6 Optimal Condition Results

Table 5 Comparison of Optimal Value and HTFS

Parameter	Optimal Value	HTFS
T _{out} (K)	692.00	692.01
ΔP (Pa)	0.436	0.436

CAC 열교환기를 최적화하기 위해 Table 4의 결과로부터 Tube 측의 압력강화 경우 요구조건 (20.63Pa)에 여유치가 있음을 알 수가 있어 목적함수에서 제외시켰고, Tube 측의 출구온도(692K)를 구속조건으로 두고, Shell 측의 압력강화가 최소일 때를 설계점의 결과는 Fig. 6과 같다. 설계인자의 최적설계 값은 x1의 경우 1.0314, x2의 경우 3.9058, x3의 경우 206.8181, x4의 경우 918로 선정되었다.

2차 다항식의 신뢰성 재검토를 위해 최적설계 값을 HTFS에 대입하여 도출한 결과와 Minitab 표면반응의 최적화 한 결과를 비교하여 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서 실험계획법을 통한 반응표면법을 도입하여 CAC열교환기의 형상 최적화를 수행한 결론은 아래와 같다.

1) Minitab 및 HTFS를 이용하여 설계인자(Shell 측의 유량, Tube layout의 TP, 높이, Tube 수량) 선정의 적절성 및 영향성을 평가한 후 분산분석을 수행하여 신뢰성을 확보했다.

2) 실험설계법을 통하여 중심합성계획법 진행한 결과 Tube 측의 출구 온도, Tube 측의 압력강화, Shell 측의 2차 다항식을 얻을 수 있었다.

$$Y_1=926.80-325.82(x_1)+87.63(x_2)-0.85(x_3)-0.11(x_4)+75.55(x_1^2)-8.48(x_2^2)+0.001(x_3^2)+3.70(x_4^2) \quad (1)$$

$$Y_2=43.23-4.05(x_1)+1.38(x_2)+0.05(x_3)-0.06(x_4)+0.98(x_1^2)-0.14(x_2^2)-1.98(x_3^2)+0.00002(x_4^2) \quad (2)$$

$$Y_3=17.28+0.39(x_1)-5.93(x_2)-0.02(x_3)-0.003(x_4)+0.24(x_1^2)+0.69(x_2^2)+0.00004(x_3^2)+0.000001(x_4^2) \quad (3)$$

3) 위의 결론으로부터 실험설계법 및 반응표면법이 열교환기의 복잡한 구조를 최적 설계하는 유용한 방법임을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. 2015R1D1A1A01058030).

References

1. R. A. Wilson, D. B. Kuprtis and D. Kodali, 1994, "Future Vehicular Recuperator Technology Projections", ASME Paper 94-GT-395, pp. 1-21.
2. R. Lundberg and R. Gabrielsson, 1995, "Process on the AGATA Project - A European Ceramic Gas Turbine for Hybrid Vehicles", ASME Paper 95-GT-446, pp. 1-7.
3. T. L. Ragland, 1995, "A High Efficiency Recuperated Cycle, Optimized for Reliable, Low Cost, Industrial Gas Turbine Engines", ASME Paper 95-GT-321, pp. 1-4.
4. G. Wilfert, J. Sieber, R. Andrew, B. Nic, T. Armel and C. Salvatore, 2007, "Environmental Friendly Aero Engine Core Concepts", ISABE-2007-1120.
5. G. Wilfert, B. Kriegl, H. Scheugenpflug, L. Bernard, X. Ruiz and S. Eury, 2005, "CLEAN-Validation of a high efficient low NOx core, a GTF high speed turbine and an integration of a recuperator in an environmental friendly engine concept", 41st AIAA/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference, Tucson, Arizona, AIAA-2005-4195.
6. J. H. Jeong, L. S. Kim, M. Y. Ha, K. S. Kim and C. J. R. Cho, 2008, "Various heat exchangers utilized in gas-turbines for performance enhancement", International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 16, pp. 30-36.

7. H. S. Jeong, J. R. Cho, L. S. Kim, M. Y. Ha, J. H. Jeong and K. S. Kim, Lindquist T., Walsh P., 2008, "CFD and thermo-mechanical analysis for heat exchanger used in aero engine", ASME Turbo Expo, GT-2008-50447, Vol. 5, pp. 177-184.
8. S. Bock, W. Hom and J. Sieber, 2007, "Active Core Technology Within the NEWAC Research Program for Cleaner and More Efficient Aero Engines". European Air and Space Conference, Berlin, Germany, Sept-2007, pp. 10-13.
9. A. M. Rolt and K. Kyprianidis, 2010, "Assessment of New Aero Engine Core Concepts and Technologies in the EU Framework 6 NEWAC Programme". ICAS 2010 Congress Proceedings, pp. 408-419.
10. S. Bock, W. Hom and J. Sieber, 2008, "'ACTIVE CORE' - A KEY TECHNOLOGY FOR MORE ENVIRONMENTALLY FRIENDLY AERO ENGINES BEING INVESTIGATED UNDER THE NEWAC PROGRAM". 26th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, Paper ICAS.
11. J. M. Kim, 2010, "Application of Response Surface Method for Optimal Transfer Conditions of MLCC Alignment System", Chanwon National University, Republic of Korea.