

가솔린 엔진에서 배기 온도 저감을 위한 열교환기 설계 최적화

이 석 환¹⁾ · 박 정 서²⁾ · 배 충 식^{*2)}

한국기계연구원¹⁾ · KAIST 기계공학과²⁾

Design of a Heat Exchanger to Reduce the Exhaust Temperature in a Spark-Ignition Engine

Seokhwan Lee¹⁾ · Jungseo Park²⁾ · Choongsik Bae^{*2)}

¹⁾Korea Institute of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

(Received 24 March 2006 / Accepted 30 May 2006)

Abstract : Design of experiments (DOE) technique has been used to design an exhaust heat exchanger to reduce the exhaust gas temperature under high load conditions in a spark-ignition engine. The DOE evaluates the influence and the interaction of a selected eight design parameters of the heat exchanger affecting the cooling performance of the exhaust gas through a limited number of experiments. The heat exchanger was installed between the exhaust manifold and the inlet of the close-coupled catalytic converter (CCC) to reduce thermal aging. To maximize the heat transfer between exhaust gas and coolant, fins were implemented at the inner surface of the heat exchanger. The design parameters consist of the fin geometry (length, thickness, arrangement, and number of fin), coolant direction, heat exchanger wall thickness, and the length of the heat exchanger. The acceptable range of each design parameter is discussed by analyzing the DOE results.

Key words : Design of experiment(실험계획법), Heat exchanger(열교환기), Thermal aging (열열화), Heat transfer (열교환)

1. 서론

배기 규제가 강화됨에 따라 엔진 내부에서의 유해가스 저감 기술만으로는 규제를 만족시키기에는 한계가 있어 추가적으로 후처리 기술(Aftertreatment technology)이 적용되고 있으며 가솔린 엔진에서는 배기정화 촉매가 널리 사용되어지고 있다. 고부하 조건에서는 배기온도 가스가 높아지면서 촉매의 성능이 감소하는 열열화(thermal aging) 현상이 발생한다.¹⁾ 현재 대부분의 자동차 생산 업체들은 배출가스 저감에 매우 효과적이라고 알려진 귀금속 팔라듐

(Pd)을 포함한 근접장착 촉매를 적용하고 있으나 장착위치로 인하여 열적부하의 문제가 생긴다.^{2,3)} 이 경우 촉매의 정화 효율이 감소할 뿐만 아니라 고온으로 인해 촉매 담체가 녹아버리는 현상이 발생하기도 한다.⁴⁾ 촉매의 열적파괴 현상의 방지를 위하여 기관에 농후혼합기를 공급함으로써 연료의 기화잠열을 이용하는 방법을 많이 사용하고 있지만, 이는 차량의 연료 경제성을 악화시키고 촉매의 정화효율을 감소시켜 일산화탄소(CO)와 미연탄화수소(HC) 같은 유해 배출가스를 증가시킨다.⁵⁾

이와 같이 배출가스 온도의 과상승은 차량의 연료 경제성과 촉매의 열적 파손에 악영향을 미친다.

*Corresponding author, E-mail: csbae@kaist.ac.kr

이전의 연구에서는 이미 정상운전 상태에서의 배출 가스 온도 측정 실험을 통하여 연료량 변화, 점화 시기 지연 운전 및 실화조건 등 비정상적인 운전조건에서 배출가스 온도 과상승을 살펴보았다. 이로부터 배출가스 온도 상승으로 인한 촉매의 열화 현상을 유발하는 주요 인자를 도출하였으며,⁶⁾ 실제 열교환기를 차량에 장착하여 촉매온도 저감 및 연료 경제성 향상 가능성을 살펴보기도 하였다.⁷⁾

본 연구에서는 EGR(Exhaust Gas Recirculation) 쿨러에서 사용되는 방식을 이용해서 설계된 수냉식 열교환기를 이용하여 배기온도를 저감하였다.⁸⁾ 열교환기는 성능을 최대화하기 위하여 내부 표면에 핀을 장착하였으며, Fig. 1에 나타난 바와 같이 배기 매니폴드와 촉매 사이에 장착되어서 배출가스와 엔진 냉각수 사이의 열교환을 통해 배출가스 온도를 낮추어준다.

열교환기의 성능에 영향을 미치는 물리적인 인자(핀 길이, 두께, 배열, 핀 개수)들의 최적 배열을 구하기 위한 실험의 수를 줄이기 위하여 실험계획법(Design of Experiment)이 사용되었다.⁹⁾ 실험계획법을 이용하게 되면 최적의 샘플을 찾아내기 위한 실험을 할 때 단지 18개의 시제작품만 필요하게 된다. 18개의 시제작품을 제작한 후 각각의 시제작품에 대한 엔진 실험을 통하여 냉각성능을 파악하였다.

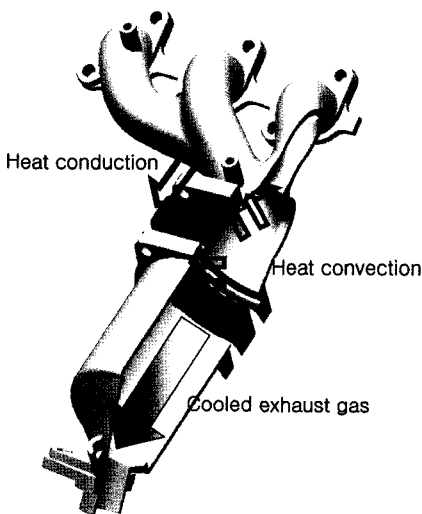


Fig. 1 Schematic diagram of heat exchanger and heat exchange phenomena

2. 실험계획법

실험계획법은 실험자가 입력 변수들(Input variables)이 결과나 제품의 품질에 어떤 영향을 미치는지를 이해하는 과학적인 접근 방식이라고 할 수 있다. 다시 말해, 최적화 작업을 위한 시스템적인 접근 방법인 것이다. 실험계획법은 통계적으로 처리가 가능한 적절한 데이터들을 수집하기 위해서 실험을 디자인하고 계획을 세우는 것이다.¹⁰⁾ 일반적으로 고전적인 실험법은 실험조건들을 일렬로 나열한 후 각각의 인자를 변화시키면서 시스템에서 생기는 결과를 살펴보는 것이다. 반대로 실험계획법은 선택된 실험 변수에 대한 실험 매트릭스나 실험 조건들을 정한 후 동시에 한 가지 이상의 변화를 살펴볼 수 있다. 즉, 하나의 실험 매트릭스는 동시에 변화하는 여러 개의 변수들을 포함하며, 시스템의 반응으로부터 각각의 변수가 가지는 효과와 각각의 변수 사이에 존재하는 교호작용 (Interaction)까지 도출할 수 있다.¹¹⁾ 열교환기의 제작에 다구찌 방법을 적용하기 위해서는 신호인자 (Signal factor), 잡음인자 (Noise factor), 제어인자 (Control factor)들이 미리 정의되어야 한다.¹⁰⁾

Fig. 2의 P-diagram은 냉각 시스템 개발 시 중요한 설계요소들을 나타내고 있다. 본 실험에서는 엔진 부하의 증가에 따라 열교환기로 인해 촉매에서 냉각되는 열전달 변화량을 측정할 것이다. 열교환기 설계 인자들로는 냉각수 유동 방향, 핀 길이, 핀 두께, 핀 개수, 안쪽 벽두께, 열교환기의 길이, 위-아래 벽두께, 핀의 배치가 있다. 잡음 인자로서는 열전달

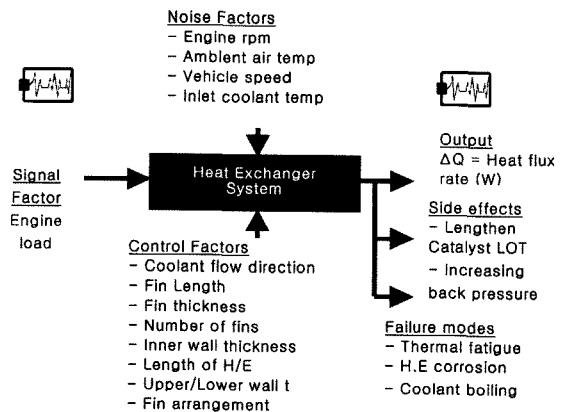


Fig. 2 Parameter diagram (P-diagram) for cooling system

량에 영향을 크게 미치는 조건인 엔진 회전속도, 냉각수 유량, 대기온도, 차량의 속도로 정의하였다. 부가적인 현상으로는 촉매의 활성화 시간이 길어질 수 있고, 배압의 증가가 있을 것이라고 예측하였다.

2.1 신호인자

신호인자는 원하는 출력을 얻기 위하여 사용자에 의해서 정해지는 인자이다. 열교환기의 이상기능은 열교환이 많이 일어나게 하는 것이다. 엔진 부하의 증가에 따라서 엔진에 공급되는 연료와 공기가 많아지기 때문에 배기유량도 증가하게 될 것이다. 즉, 엔진 부하의 증가에 따라 열교환기에 의해 발생하는 열교환의 크기는 비례할 것이다. 신호인자에 따라서 출력이 선형적인 비례 관계가 있어야 하므로, 본 연구에서는 신호인자를 엔진 부하, 출력반응을 열전달량(Heat flux rate)으로 정의하였다.

Table 1은 본 연구에서 사용되는 신호인자의 수치를 나타내고 있다. 신호인자로는 ECU에서 측정되는 Relative load 값을 이용하였으며, 20~60%까지 5 단계로 나누었다.

Table 1 Signal factors

Signal factor	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5
Relative load	20%	30%	40%	50%	60%

2.2 잡음인자

잡음 인자는 생산과정에서는 제어하기가 어렵고 비용도 많이 들지만 실험과정에서는 제어가 가능한 인자이다. 잡음인자는 결과물이 초기에 기대한 값에서 벗어나 산포를 가지게 되면서 생기는 인자이다. 본 연구에서는 잡음인자를 열교환기의 열전달량에 직접 영향을 줄 수 있는 엔진 회전속도, 대기온도, 차량의 속도로 정의하였다. 냉각수를 순환시키기 위하여 엔진 내부의 물펌프를 사용하였기 때문에 엔진 회전수는 냉각수의 유량과 같은 조건이라고 할 수 있다. Table 2는 잡음인자에 대해서 나타내고 있다. N1 조건은 열교환이 잘 일어나지 않는 조건, 즉 낮은 엔진 회전속도, 높은 대기온도, 낮은 차량 속도이며, N2는 그 반대의 조건으로 열교환이 잘 일어나는 상태이다. N1 조건을 만들기 위하여 배기 매니폴드 앞에 히터를 장착하였고, N2 조건을 모사

Table 2 Noise factors

Noise	Condition	Engine speed	Engine room temp	Vehicle speed
N1	Low Q	2000 rpm	90 °C	0 km/h
N2	High Q	4500 rpm	50 °C	130 km/h

하기 위하여 배기 매니폴드 앞에 송풍기를 장착하여 배기 매니폴드를 냉각시켰다.

2.3 제어인자

제어인자는 생산과정에서 쉽게 제어가 가능한 인자이다. 실험계획법의 목적은 제어인자들 사이에서 최적의 조건을 구하는 것이다. 최적의 성능을 가지는 열교환기를 설계하기 위하여 8개의 제어인자를 정하였다. 제어인자로 정한 조건은 냉각수 순환방향(A), 핀의 길이(B), 핀의 두께(C), 핀의 개수(D), 내벽의 두께(E), 열교환기의 길이(F), 위,아래 벽 두께(G), 핀의 배열(H)이다. Fig. 3은 제어 인자를 알기 쉽게 개략도로 표현한 것이다. Table 3에서는 제어 인자들의 수치를 나타내었다.

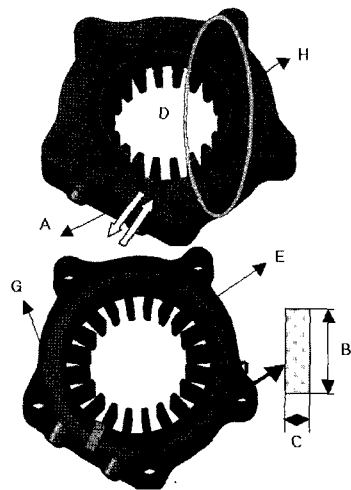


Fig. 3 Schematic diagram of control factors

2.4 L18 Orthogonal Array

실험 계획법의 가장 큰 장점은 제어 인자에 따른 전조합법을 사용하지 않고 필요한 경우만의 샘플을 만들어 실험할 경우에도 최적의 제어 인자 조건을 찾을 수 있다는 것이다. 본 연구에서도 전조합법에

Table 3 Control factors

	Control factor	Level1	Level2	Level3
A	Coolant flow direction	Clockwise	Counter clockwise	-
B	Fin length	10mm	15mm	20mm
C	Fin thickness	1.5mm	2mm	2.5mm
D	Number of fin	10	15	20
E	Inner wall thickness	2mm	3mm	4mm
F	Length of heat exchanger	18mm	20mm	22mm
G	Upper/Lower wall thickness	3mm	4mm	5mm
H	Fin arrangement	1:1	1:1.3	1:1.6

Table 4 L18orthogonal array to find optimal control factor

	A	B	C	D	E	F	G	H	M1 : 20%	M2 : 30%	M3 : 40%	M4 : 50%	M5 : 60%	
									N1	N2	N1	N2	N1	N2
1	1	1	1	1	1	1	1	1						
2	1	1	2	2	2	2	2	2						
3	1	1	3	3	3	3	3	3						
4	1	2	1	1	2	2	3	3						
5	1	2	2	2	3	3	1	1						
6	1	2	3	3	1	1	2	2						
7	1	3	1	2	1	2	1	3						
8	1	3	2	3	2	1	3	1						
9	1	3	3	1	3	2	1	2						
10	2	1	1	3	3	2	2	1						
11	2	1	2	1	1	3	3	2						
12	2	1	3	2	2	1	1	3						
13	2	2	1	2	3	1	3	2						
14	2	2	2	3	1	2	1	3						
15	2	2	3	1	2	3	2	1						
16	2	3	1	3	2	3	1	2						
17	2	3	2	1	3	1	2	3						
18	2	3	3	2	1	2	3	1						

의하면 2×37=4374개의 샘플을 만들어야 하지만 실험계획법을 적용하면 18개의 샘플만으로도 최적 분석을 행함으로써 최적 인자를 찾을 수 있다. 직교배열법은 전조합법에 의해서 정해지는 실험조건 중 꼭 필요한 부분에 대한 실험을 정하는 방법이다. 직교배열법에 의해서 정해지는 인자들의 조합은 각각의 인자들이 미치는 영향에 대한 정보를 충분히 제공할 수 있다. 직교배열법에서는 실험이 행해지는 순서에 대해서도 정해준다. Table 4는 최적의 제어 인자를 찾기 위하여 만든 직교배열표이다. 왼쪽 부분은 18개의 샘플을 구성하는 제어 인자들을 나타내고 있다. L18 직교배열표를 사용하기 위해서는 8가지 조건의 제어인자를 설정하여야 하며, 2수준의 제어인자 1개와 3수준의 제어인자 7개를 구성하여 표와 같이 18개의 조합을 만들어야 한다. M은 신호 인자를 나타내고 있고, N은 잠음 인자를 나타내고 있다. 본 연구에서는 출력반응을 열교환기에 의해 생기는 열전달량으로 정의하였으므로 빈칸에 각 실험 조건에 대해서 얻어지는 열전달량을 채워 나가면 되는 것이다. Fig. 4는 최적의 제어 조건을 찾기 위하여 만든 18개의 샘플이다.

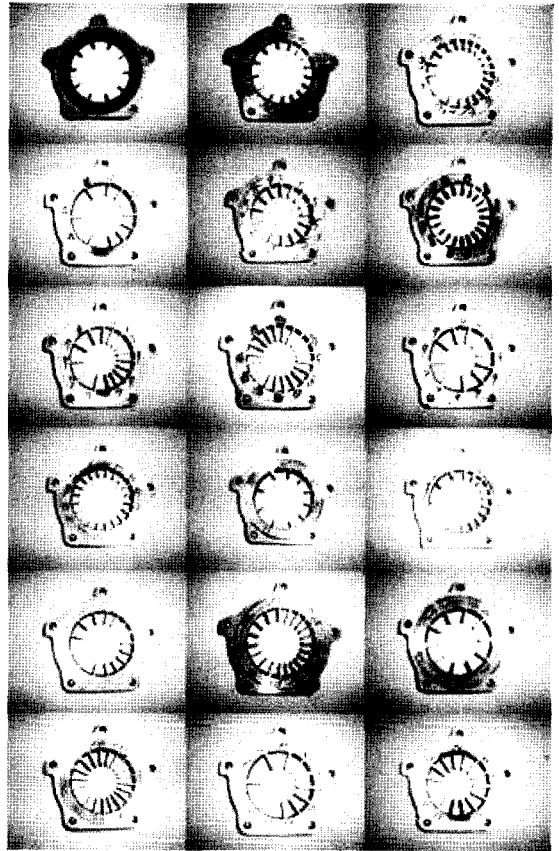


Fig. 4 Photographs of 18 samples to find the optimal level of each control factor

3. 실험장치 및 방법

3.1 대상엔진

본 실험에서 사용한 엔진은 1.0L 상용 가솔린 엔진으로 유럽의 EURO-3 Mode 배기규제에 대응하기 위하여 근접장착 촉매가 부착된 엔진이다. 엔진 운전 변수들을 파악하고 ECU의 연료 배핑값을 변화시키기 위해 프로그래밍이 가능한 ECU(Engine Management System ; NTK + ETAS MAC2)를 사용하였으며, 엔진의 주요 제원은 Table 5와 같다.

엔진 내부에 설치되어 있는 냉각수 순환 펌프를 이용하여 열교환기 쪽으로 냉각수를 순환시키고자

Table 5 Engine specifications

Specifications	Resources
Cylinder	4
Bore(mm)	66
Stroke(mm)	73
Bore pitch(mm)	72.5
Displacement(cc)	999
Compression ratio	9.8

하였다. 냉각수로는 물 50% + Ethylene Glycol 50%의 혼합물을 사용하였다. 엔진 내부의 냉각수 순환 펌프를 이용하기 위하여 히터코어(Heater core) 쪽으로 흐르는 냉각 라인을 열교환기 쪽으로 연결해 주었다. 엔진 내부의 순환 펌프를 이용하므로 엔진 회전속도의 증가에 따라 냉각수 유량이 증가한다.

3.2 온도측정

배출가스, 촉매장치 및 냉각수의 온도를 파악하기 위해서 K 타입의 열전대식 온도측정 장치를 사용하였으며, 촉매 담체의 중심선을 따라 앞면에서부터 25 mm의 지점에 40 mm의 깊이로 장착하였다. 지름이 3.2 mm가 되는 열전대를 사용하였으므로, 촉매 담체의 Bulk 온도라고 간주할 수 있다. 2500, 4500 rpm의 엔진 회전속도 조건에서 여러 운전 조건에 따른 정상상태에서의 온도를 측정하였다.

3.3 열전달량(Heat flux rate)

열교환기로 인해 배기계에서 전달되는 열전달량을 구하기 위하여 우선 열교환기가 없는 경우에 각 조건에서의 촉매 온도를 측정하고 18개의 샘플을 장착하여 각 샘플에서 운전 조건에 따른 촉매의 온도를 측정한 후 그 차이를 이용하여 열전달량을 계산하였다. 두 온도를 동시에 측정하는 것은 아니지만 엔진 회전수와 부하 조건을 동일한 조건으로 하여 정상상태에서 온도를 측정하므로 같은 조건에서 동시에 측정된 값이라도 생각하여도 무방하다. 열전달량은 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\dot{Q} = \dot{M}_g \times C_{pg} \times (T_{cat_ref} - T_{cat_sam}) \quad (1)$$

\dot{M}_g : 배출가스 유량

C_{pg} : 가스 비열

T_{cat_ref} : 열교환기가 없는 경우 촉매온도

T_{cat_sam} : 열교환기를 적용한 경우 촉매온도

배출가스 유량인 \dot{M}_g 는 엔진이 이론 공기연료비 상태에서 운전된다고 가정하여 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\dot{M}_g = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel} = \left(1 + \frac{1}{14.6}\right) \times \dot{m}_{air} \quad (2)$$

($\lambda = 1.0$ 인 경우)

\dot{m}_{air} = Intake air mass rate, \dot{m}_{fuel} = Fuel mass rate

\dot{m}_{air} 는 ECU RAM Data로 측정이 가능하다.

3.4 분산분석법(Analysis of Variance)

분산분석법(ANOVA; Analysis of Variance)은 각각의 제어 인자들이 출력 특성에 미치는 영향을 수치적으로 추정하기 위하여 사용된다. 분산분석법에 의해 아래에 기술된 일련의 식들을 이용하여 동특성의 특성값을 구할 수 있다.

1) 신호 인자 수준들의 제곱합을 구한다.

M = Relative engine load (%)

신호 인자 수준들의 제곱합

$$r = M_1^2 + M_2^2 + M_3^2 + M_4^2 + M_5^2 = 0.2^2 + 0.3^2 + 0.4^2 + 0.5^2 + 0.6^2 = 0.9$$

$r_0 = 2$ (M_i 에 나타나 있는 데이터의 수이며 본 연구에서는 두 개의 잡음인자 조건이 있다.)

2) 모든 데이터 점들의 제곱합(출력의 제곱합)을 구한다.

$$S_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 = y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2$$

각 데이터 점에 대해서 0과 최소제곱 최적합 직선 (원점기준) 간의 거리의 제곱합(기울기의 제곱에 비례)

$$S_\beta = \frac{1}{r_0 \times r} (M_1 Y_1 + M_2 Y_2 + M_3 Y_3 + M_4 Y_4 + M_5 Y_5)^2$$

각 데이터 점과 최소제곱 최적합 직선간의 거리의 제곱합(노이즈와 비선형성에 비례)

$$S_e = S_T - S_\beta$$

3) 분산과 S/N(Signal to noise)비를 구한다.

$$V_e = \frac{S_e}{n-1}$$

S/N 비(기울기/주위 산포)

$$S/N = \eta_{ab} = 10 \times \text{Log} \frac{\frac{1}{r \times r_0} (S_\beta - V_e)}{V_e}$$

4) β값(최선 적합 직선의 기울기, 성능변수)을 구한다. 실험값들은 아래의 최소자승법을 이용하여 영점을 지나는 선에 의해 맞춰진다.

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{r_0} (y_{ij} - \beta M_i) M_i = 0$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{r_0} y_{ij} M_i}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{r_0} (M_i)^2} = \frac{(M_1 Y_1 + M_2 Y_2 + M_3 Y_3 + M_4 Y_4 + M_5 Y_5)}{r_0 \times (M_1^2 + M_2^2 + M_3^2 + M_4^2 + M_5^2)}$$

$$= \frac{1}{r_0 \times r} (M_1 Y_1 + M_2 Y_2 + M_3 Y_3 + M_4 Y_4 + M_5 Y_5)$$

4. 실험결과

4.1 최적샘플을 구하기 위한 분산분석 과정

Table 6은 위의 식들을 이용하여 동특성의 특성값을 구한 표를 나타낸 것이다. 일련의 과정들을 거쳐서 1번부터 18번 시제작품에서 성능 변수인 β값과 S/N비를 각각 구할 수 있었다. 평균 값은 4783.2 정도로 계산 되었고 1번 시제작품의 성능이 가장 안 좋고 18번 시제작품의 성능이 가장 좋게 평가되었다. 각 시제작품에서 구한 β값과 S/N비를 이용하여 제어인자 각각의 β값과 S/N 비를 구한 결과를 Table 7에 나타내었다.

S/N비의 경우는 각 제어인자 및 수준에 별 영향을 받지 않는다. 이는 곧 열교환기의 성능이 열전달이 잘 이루어지지 않는 조건의 경우인 N1과 열전달이 잘 이루어지는 조건인 N2에 별 상관없이 나타난다. 성능 변수를 살펴보면 제어 인자의 수준에 따른 변화가 있는 것을 알 수 있다.

Table 6 The DOE statistic matrix and response table of β and S/N ratio

	A	B	C	D	E	F	G	H	0.2		0.3		0.4		0.5		0.6	
									N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂
1	1	1	1	1	1	1	1	1	173.8	630.5	274.4	1250.6	396.4	1647.7	681.5	1997.5	968.7	2899.0
2	1	1	2	2	2	2	2	2	307.4	1064.3	483.8	1873.6	708.2	2476.2	1089.0	3248.6	1557.5	3950.2
3	1	1	3	3	3	3	3	3	323.5	1077.5	517.3	1874.6	684.3	2532.3	1089.0	3379.1	1497.0	4660.0
4	1	2	1	1	2	2	3	3	269.6	938.1	407.1	1631.8	552.4	2061.1	908.0	2934.6	1225.1	3706.2
5	1	2	2	2	3	3	1	1	341.1	1179.2	526.2	1950.6	708.2	2596.4	1149.7	3559.8	1552.0	4428.5
6	1	2	3	3	1	1	2	2	402.0	1190.5	632.6	2076.1	869.6	2867.1	1225.8	3772.5	1734.0	5001.6
7	1	3	1	2	1	3	2	3	360.7	1092.7	597.0	1820.7	774.1	2457.2	1133.9	3387.8	1606.3	4537.3
8	1	3	2	3	2	1	3	1	460.8	1239.7	671.5	2072.2	923.1	2737.7	1344.3	3839.5	1798.7	4914.7
9	1	3	3	1	3	2	1	2	341.5	1079.2	535.7	1863.8	751.0	2506.8	1119.5	3399.3	1631.3	4001.0
10	2	1	1	3	3	2	2	1	384.1	1189.0	614.9	1978.4	881.0	2732.6	1284.4	3662.8	1767.9	3822.6
11	2	1	2	1	1	3	3	2	307.5	966.2	477.6	1771.3	726.7	2366.8	1119.0	3141.9	1539.1	3529.5
12	2	1	3	2	2	1	1	3	360.9	1100.2	557.5	1988.1	846.7	2674.3	1254.9	3675.5	1741.3	3966.3
13	2	2	1	2	3	1	3	2	360.9	1100.8	575.1	2001.6	822.6	2673.5	1134.8	3604.9	1613.3	4007.4
14	2	2	2	3	1	2	1	3	485.0	1472.3	718.3	2438.2	1091.2	3451.6	1526.7	4505.4	2088.1	5851.5
15	2	2	3	1	2	3	2	1	437.5	1305.0	663.6	2238.9	959.3	3006.7	1390.4	4058.7	1886.3	4242.0
16	2	3	1	3	2	3	1	2	514.2	1462.0	767.0	2428.0	1133.6	3315.6	1579.7	4554.4	2087.7	5631.2
17	2	3	2	1	3	1	2	3	438.0	1338.3	690.4	2303.6	1007.0	3102.4	1414.3	4276.6	1916.8	4879.7
18	2	3	3	2	1	2	3	1	508.4	1499.3	793.7	2542.4	1149.9	3424.3	1563.5	4728.8	2098.3	5880.9
DPT	2	3	3	3	2	2	2	3	549.1	1594.5	865.2	2550.6	1224.1	3561.3	1690.4	4988.8	2258.4	6308.3

r0=	2		0.9		Y4		Y5		ST		Sβ		Se		Ve		β		S/N	
r=	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	ST	Sβ	Se	Ve	β	S/N									
804.3	1525.0	2044.1	2679.1	3867.7	18736233.4	14428305.57	4307927.78	478658.64	2831.21	12.09										
1371.7	2357.5	3184.4	4337.6	5507.7	41373775.4	33185024.17	8188751.19	909861.24	4293.73	12.95										
1401.0	2391.8	3216.6	4468.1	6157.0	48489760.4	37470600.55	11018159.84	1224239.98	4562.57	12.16										
1207.6	2038.9	2613.5	3842.6	4931.3	33007782.4	25528086.35	7479696.04	831077.34	3765.94	12.18										
1520.3	2476.8	3304.6	4709.5	5980.5	48845465.0	38382714.83	10462750.17	1162527.80	4617.76	12.50										
1592.5	2708.7	3736.7	4998.4	6735.6	59023048.6	46678531.29	12344517.29	1371613.03	5092.40	12.64										
1453.3	2417.7	3231.4	4521.7	6142.6	47559648.1	37857980.98	9701667.09	1077963.01	4586.09	12.78										
1700.4	2743.7	3660.8	5183.8	6710.4	58769008.6	47490120.12	11278888.45	1253209.83	5136.48	13.12										
1420.7	2419.5	3257.7	4518.7	5632.3	43442472.7	35129037.30	8313435.37	923715.04	4417.71	13.13										
1573.2	2583.3	3613.5	4947.2	5590.5	46900192.4	38882900.66	8017291.76	890810.20	4647.75	13.75										
1293.7	2249.1	3093.4	4260.9	5068.6	36512823.5	29951304.05	6561519.45	729057.72	4079.17	13.48										
1461.0	2545.6	3521.0	4930.4	5707.6	47320499.5	38772273.79	8548225.75	949802.86	4641.14	13.45										
1461.7	2576.6	3496.1	4739.7	5620.7	46448537.5	37410973.72	9037563.81	1004173.76	4558.93	13.04										
1957.3	3154.5	4542.8	6032.1	7939.6	83194950.5	66427075.99	16767874.48	1863097.16	6074.86	12.84										
1742.5	2902.4	3966.0	5449.1	6128.3	57266871.2	47095413.29	10171457.90	1130161.99	5115.09	13.54										
1976.1	3195.0	4449.1	6134.1	7718.9	80469952.2	65181819.34	15288132.84	1698681.43	6017.65	13.17										
1776.3	2994.0	4109.4	5690.9	6796.5	66180238.7	53579905.25	12600333.42	1400037.05	5455.88	13.16										
2007.7	3336.1	4574.2	6292.3	7979.2	86442570.1	69263191.82	17179378.23	1908819.80	6203.19	12.92										
2143.6	3415.8	4785.4	6659.2	8566.7	96720823.4	77844721.81	18876101.61	2097344.62	6576.25	13.02										

Table 7 Relative contribution of each level of the control factors to the β and S/N ratio

Factor	S/N	β	Factor	S/N	β
A1	12.616	4367.1	E1	12.792	4811.15
A2	13.262	5199.3	E2	13.067	4828.34
			E3	12.957	4710.1
B1	12.979	4175.9	F1	12.916	4619.34
B2	12.79	4870.8	F2	12.962	4900.53
B3	13.047	5302.8	F3	12.938	4829.72
C1	12.835	4401.3	G1	12.865	4766.72
C2	13.008	4943	G2	13.135	4865.16
C3	12.974	5005.3	G3	12.816	4717.71
D1	12.93	4277.5	H1	12.987	4758.58
D2	12.94	4816.8	H2	13.068	4743.26
D3	12.946	5255.3	H3	12.762	4847.74

S/N비는 제어인자와 수준에 따른 영향이 작기 때문에 β 값에 대한 최적 수준을 찾는다. 각 인자별로 최적 수준은 A2, B3, C3, D3, E2, F2, G2, H3임을 알 수 있다. 결과를 살펴보면 제어인자 A, B, C, D의 경우는 수준에 따른 차이가 크지만 E, F, G, H는 수준에 따른 차이가 크지 않다. 즉, 냉각수의 순환 방향과 핀의 형상들이 열교환기의 성능에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있으며, 각 인자별로 나타난 최적수준을 조합하면 최적의 성능을 가지는 열교환기를 설계할 수 있다.

4.2 재현성 실험(Confirmation test)

제어 인자별로 찾은 최적수준을 조합하여 최적 시제품을 제작하였다. Fig. 5는 최적 시제품의 사진을 나타내고 있다.

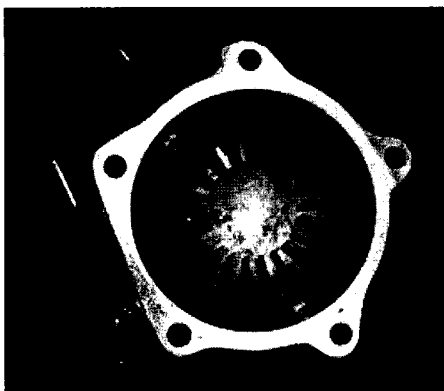


Fig. 5 Photograph of optimal heat exchanger

재현성 실험의 목적은 최적 시제품이 갖는 S/N비와 β 값이 통계적인 방법으로 계산을 통하여 구하였으므로 실제 상황에서 재현되는지를 확인하는 것이다. 재현성 실험을 통하여 얻은 값들이 추정치와 일치하게 되면 실제 상황에서 최적화 샘플의 강건성(Robustness)과 민감도(Sensitivity)는 재현된다고 할 수 있다.^{12,13)}

실제 실험을 하기 전에 계산을 통하여 최적 시제품의 S/N비와 β 값을 추정할 수 있다. 계산식은 다음과 같다.

$$\beta_{opt} = \bar{T} + (\bar{A}_2 - \bar{T}) + (\bar{B}_3 - \bar{T}) + (\bar{C}_3 - \bar{T}) + (\bar{D}_3 - \bar{T}) + (\bar{E}_2 - \bar{T}) + (\bar{F}_2 - \bar{T}) + (\bar{G}_2 - \bar{T}) + (\bar{H}_3 - \bar{T}) = 6721.6$$

\bar{T} 는 모든 인자들이 가지는 값들의 평균이다.

실제로 실험을 통하여 계산한 값은 6576.3으로 계산값과 비교하면 2% 정도의 오차로 상당히 정확하다. Table 8은 추정치와 실험값을 비교한 표이다. 1번 시제품과 비교해 보면 최적 시제품이 2배 이상의 좋은 성능을 보임을 알 수 있다.

Table 8 Comparison S/N ratio and β between predicted and experimental data

	추정치		확인실험	
	S/N	β	S/N	β
Sample#1	12.32	2696	12.09	2831.2
최적설계	13.62	6721.6	13.02	6576.3
이득	0.70dB	149%	0.93dB	157%

5. 결론

열교환기의 냉각성능을 최대화하기 위한 최적 핀 형상을 찾기 위해 실험계획법을 통하여 18개의 시제품을 만들어 실험을 수행하였다. 실험계획법을 통해 얻어진 최적 시제품으로 엔진 실험을 한 결과 다음의 결론들을 얻을 수 있었다.

- 1) 핀의 기하학적 형상(길이, 두께, 개수)와 냉각수의 순환방향이 열교환기의 냉각성능에 가장 큰 영향을 미친다.
- 2) 초기 디자인의 열교환기(1번 시제품)과 비교하였을 때, 최적 시제품은 냉각성능이 2배 이상 뛰어나다.

- 3) 초기 디자인과 비교하면 최적 시제작품의 S/N비의 이득은 0.23 dB이다.
- 4) S/N비와 β 값의 이득은 재현이 가능하며, 어떤 엔진 운전조건에서도 최적화 샘플의 강건성(Robustness)이 보장된다는 사실을 재현 실험을 통하여 알 수 있다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(Combustion Research Engineering Center) 및 중소형 LPG 상용차 기술개발 과제에 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 1) Y. K. Lui and J. C. Dettling, "Evolution of Pd/Rh TWC Catalyst Technology," SAE 930249, 1993.
- 2) R. J. Brisley, R. D. O'Sullivan and A. J. J. Willkins, "The Effect of High Temperature Ageing on Platinum-Rhodium and Palladium-Rhodium Three Way Catalysts," SAE 910175, 1991.
- 3) T. Nagel, W. Maus and J. Breuer, "Development of Increased Test Conditions for Close-Coupled Catalyst Applications," SAE 962079, 1996.
- 4) R. D. O'Sullivan and N. S. Will, "The Effect of Intermittent Misfire and Air to Fuel Ratio Excursions on Exhaust Catalyst Temperature," SAE 940927, 1994.
- 5) B. Grandin and H. S. Angstrom, "Replacing Fuel Enrichment in a Turbo Charged SI Engine : Lean Burn or Cooled EGR," SAE 1999-01-3505, 1999.
- 6) S. Lee, C. Bae, Y. Lee and T. Han, "Effects of Engine Operating Conditions on Catalytic Converter Temperature in an SI Engine," Transactions of KSAE, Vol.10, No.3, pp.61-69, 2002.
- 7) S. Lee and C. Bae, "Effect of Exhaust Heat Exchanger on Catalytic Converter Temperature in an SI Engine," Transactions of KSAE, Vol. 12, No.2, pp.74-82, 2004.
- 8) Ngy Srun AP, "Exhaust Heat Exchange Coefficient in a Pipe of an Internal Combustion Engine: EGR Cooler and Passenger Compartment Heating Applications," SAE 2000-01-0966, 2000.
- 9) M. B. Botros, B. S. Absulnour, T. E. Smith and M. C. Lai, "Optimum Design Parameters of an Automotive Blower Fan Housing Scroll," SAE 960965, 1996.
- 10) J. Antony and M. Kaye, Experimental Quality - A Strategic Approach to Achieve and Improve Quality, Kluwer Academy Publisher, 1999.
- 11) W. Y. Fowlkes and C. M. Creveling, Engineering Methods for Robust Product Design - Using Taguchi Methods in Technology and Product Development, Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- 12) G. Taguchi and S. C. Tsai, "Quality Engineering (Taguchi Method) For The Development Of Electric Circuit Technology," IEEE Transactions, Vol.44, No.2, pp.225-229, 1995.
- 13) G. Taguchi, "Taguchi Methods in LSI Fabrication Process," IEEE International 6th Workshop on Statistical Methodology, pp.1-6, 2001.