

전산유체해석과 다구찌 방법을 연계한 공기 가열식 히터 시스템의 난방속효성 최적화에 관한 연구

김민호*

현대자동차

A Study on the Optimum Design of Warm-up rate in a Air-Heated Heater System by Using CFD Analysis and Taguchi Method

Minho Kim*

Research & Development Division for Hyundai Motor Company & Kia Motors Corporation, 772-1 Jangduk-dong, Whasung-si, Gyeonggi 445-706, Korea

(Received 6 September 2004 / Accepted 12 January 2005)

Abstract : The objective of this paper is to describe the optimization of design parameters in a large-sized commercial bus heater system by using CFD(computational fluid dynamics) analysis and Taguchi method. In order to obtain the best combination of each control factor which results in a desired performance of heater system, the parameter design of the Taguchi method is adopted for the robust design considering the dynamic characteristic. The research activity may be divided into four phases. The first one is analyzing the problem, i.e., ascertaining the influential factors. In the second phase the levels were set in such a way that their variation would significantly influence the response. In the third phase the experimental runs were designed. In the final phase the planned runs were carried out numerically to evaluate the optimal combination of factors which is able to provide the best response. In this study, eight factors were considered for the analysis: one with two level and seven with three level combinations comprising the $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ orthogonal array. The results of this study can be summarized as follows ; (i)The optimum condition of control factor is a set of $\langle A_2 B_1 C_3 D_3 E_1 F_2 G_3 H_2 \rangle$ where A is shape of the outer fin, B is pitch of the outer fin, C is height of the outer fin, D is the inner fin number, E is the inner fin height, F is length of the flame guide, G is diameter of the heating element and H is clearance between air guide and heating element. (ii)The heat capacity of heated discharge air under the optimum condition satisfies the equation $y=0.6M$ where M is a signal factor. (iii)The warm-up rate improves about three times, more largely as compared with the current condition, which results in about 9.2minutes reduction.

Key words : Design parameter(설계변수), Taguchi method(다구찌법), Orthogonal array(직교표), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Bus heater(버스히터), Signal factor(신호인자), Control factor(제어인자)

Nomenclature

k : number of signal factor
 M_1, M_2, M_3 : signal factor

N_1, N_2 : noise factor
r : effective number of replication
 r_0 : number of response data for each signal level
 S_E : error sum of square
 S_T : total sum of square
 S_β : variation of linear effect of signal factor

*To whom correspondence should be addressed.
cfdknh@hyundai-motor.com

- V_E : error variance
- Y : response of characteristic value
- α, β^* : flow resistance coefficient
- β : sensitivity coefficient

1. 서론

최근 들어 고속버스 차량이 주요 운송수단으로 자리 잡으면서 운전자 및 승객들의 객실 공간의 안락함과 쾌적한 열 환경에 대한 관심이 증대되고 있다. 그러므로 쾌적한 열 환경을 갖는 객실공간의 창출은 운송업체 및 자동차 제조사 모두에게 중요한 과제로 인식되고 있다. 대형버스의 경우 겨울철 객실 난방을 위해 프리 히터(pre-heater) 시스템을 장착하고 있다. 히터 시스템의 설계는 난방 속효성, 친환경성, 소음, 쾌적성 등의 성능 측면과 정비성, 경제성, 안전성 등을 동시에 고려해야 한다. 이 중에서도 히터가동 후 빠른 시간내에 객실 내부로 적정한 온풍을 공급하는 것을 의미하는 난방 속효 성능은 매우 중요한 항목이다. 히터 시스템에 대한 기존의 연구들은 난방 성능 예측을 위한 해석모델 개발에 대한 연구^{1,2)}와 냉시동 초기에 히터 성능이 유해가스 배출에 미치는 영향^{3,4)} 그리고 히터의 성능평가에 대한 실험적 연구⁵⁾ 등이 주를 이루나 대부분 승용차에 국한되며 상용차 히터 시스템의 최적설계에 대한 체계적인 연구는 미흡한 실정이다.

대형 버스에 사용되는 히터 유니트(heater unit)는 무수히 많은 설계 변수들이 있다. 이러한 각종 변수들은 히터 유니트 내부의 열전달 및 유동특성에 지대한 영향을 미친다. 따라서 각 설계변수가 난방 성능에 미치는 영향에 대한 체계적인 분석을 수행하였다. 이를 위하여 여러 설계변수들의 효과 고찰에 매우 유용한 도구로 알려진 다구찌 법(Taguchi method)^{6,7)}을 도입하였다.

본 연구에서는 공기 가열식 히터시스템의 난방속효 성능 최적화를 위해 먼저 히터 시스템의 성능에 큰 영향을 미친다고 판단되어지는 핵심변수(vital few)를 선별한 후, 설계변수 변화에 따른 혼합 직교배열표(orthogonal array)를 작성하였다. 각 수치실험 모델에 대한 전산 유체 해석을 수행한 후 동특성이 고려된 다구찌 기법을 통해 성능관련 인자들에 대

한 최적 설계조건을 제시하고자 한다.

2. 공기가열식 히팅 시스템

히터 시스템은 가열방식에 따라 여러 방식으로 나뉜다. 연소열을 열원으로 하는 냉각수 가열식과 냉각수 차단식이 있으며, 전기를 열원으로 하는 PTC 소자(Positive Temperature Coefficient thermistor heating elements), 고주파 가열식 등이 있다.

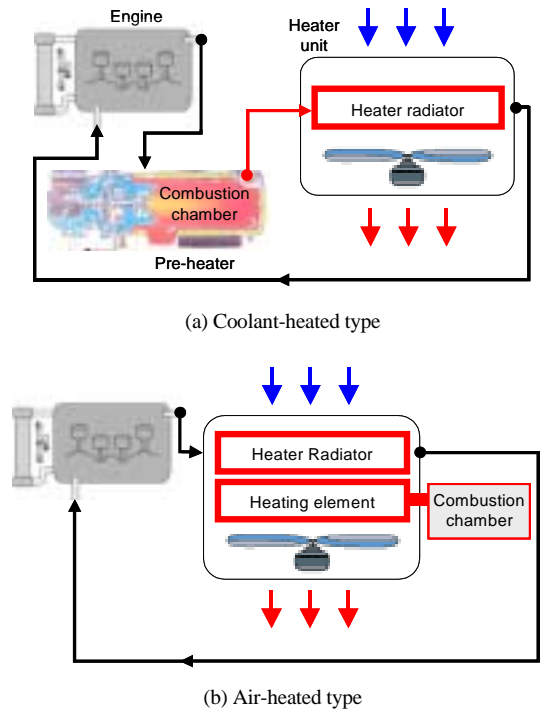


Fig. 1 Schematic diagram of heating system

대형버스에 사용되는 히터 시스템의 이해를 돕고자 Fig. 1은 냉각수 가열식과 본 연구를 통해 개발한 공기 가열식 히터 시스템에 대한 개략도를 도시하였다. 히터 유니트는 열원을 공급하기 위한 프리히터, 열 교환을 위한 발열체(heating element), 공기 유도판(air guide), 공기의 강제순환을 위한 송풍기(blower) 그리고 히터 라디에이터(heater radiator) 등으로 구성되어 있다. 현재 대형버스 난방을 위해 적용하고 있는 냉각수 가열방식은 히터 유니트와 프리히터가 이원화 되어 있으며 냉각수가 프리히터를 통과하는 동안 가열되고, 가열된 냉각수가 히터 라

디에이터를 통과하면서 팬에 의해 강제 유입된 차가운 냉기와 열 교환이 이루어진다. 반면 본 연구를 통해 개발된 공기 가열식 히터 시스템은 히트 유니트와 프리히터가 일체화 되어 있고 프리히터에 의해 전열체가 가열되고 차가운 공기가 전열체 주위를 통과하면서 직접 가열되는 방식이다.

Table 1 Comparison of pre-heater specification

Items	Coolant heated type	Air heated type
Rated voltage(V)	24(20~28)	12
Heat output(kcal/h)	18,000	4,500
Fuel consumption(ℓ/h)	2.7	0.6
Electrical consumption(A)	10	4
Water throughput(ℓ/h)	4,800	N/A
Weight(kg)	27	3.2
Dimension (L×W×H, mm)	691×293×286	231×111×163

Table 1은 냉각수 및 공기 가열식 프리히터의 제원을 비교하였다. 현재 적용되고 있는 냉각수 가열 방식 히터 시스템은 연소열에 의해 냉각수를 가열하는 방식으로 실내난방 및 엔진 워밍업을 동시에 기대할 수 있으나 난방 속효성이 떨어지고 주행전 엔진 및 프리히터의 장시간 가동으로 연비저하 및 매연증가라는 단점을 가지고 있다. 냉각수 가열방식의 목표 냉각수온은 약 40°C로써 이때의 히트 유니트로부터 토출되는 온풍 온도는 약 32°C이다. 목표 냉각수온인 40°C에 도달하기 위해서는 냉각수 가열 방식으로는 약 20여분 소요되므로 난방 속효성 측면에서는 매우 열악한 실정이다. 또한 엔진 냉각수를 가열하기 위해 워터 펌프(water pump) 등의 냉각수 순환장치가 필요하므로 구조가 복잡하고 중량이 증가하며 조립공수가 과다하게 된다. 본 연구에서는 공기 가열식 히터 시스템 개발을 통해 부품 단순화 및 중량저감을 도모하였고 목표 온풍 토출 시간을 단축하여 난방 속효 성능을 개선하였다.

3. 동특성을 고려한 다구찌 방법의 적용

3.1 변수설계

제품의 성능은 각종 설계 인자들에 의해 좌우되는데 설계변수가 적은 경우 실험이나 해석을 통해

각 변수의 영향을 고찰할 수 있지만 설계변수가 많은 경우 각 변수의 영향을 사전에 파악하는 것은 매우 힘든 작업이다. 다구찌 방법은 신호인자(signal factor)의 효과를 유지하면서 잡음인자(noise factor)의 영향을 최소화하는 방법으로 설계변수가 많은 경우에도 크게 실험회수를 증가시키지 않고, 통계적인 데이터 분석을 통해 설계변수를 설정하는 강건설계(robust design)의 중요한 도구로서 사용된다.

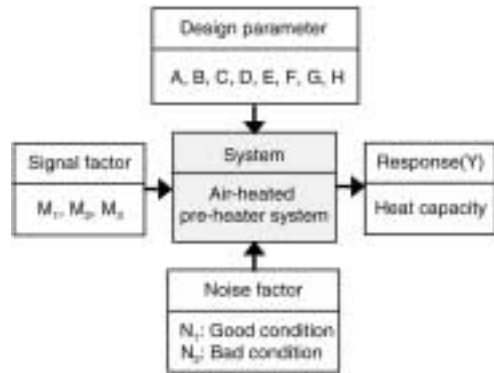


Fig. 2 Parameter diagram

Fig. 2는 히터 시스템의 설계인자 파라미터 다이어그램(parameter diagram)을 도시하였다. 파라미터 설계 방법은 시스템의 신호인자 존재 여부에 따라 동특성과 정특성으로 분류할 수 있는데 대부분의 실제 시스템에서 발생하는 현상은 동특성의 관점에서 다루어져야 한다. 본 연구에서는 다구찌 방법을 이용한 히터 시스템의 성능최적화를 위해 신호인자는 연료량 변화에 따른 공급열량의 변화로 하였다. Table 2와 Fig. 3에 도시한 바와 같이 제어인자로서(control factor)는 외부핀 형상, 외부핀 피치(pitch), 외부핀 높이, 내부핀 개수, 화염가이드와 핀 사이의 간격, 화염가이드 길이, 연소챔버 직경, 에어 가이드 간격 등의 8개의 인자를 선정하였고 잡음인자는 외기온으로 하였다. 다구찌 실험방법 중에서 변수설계(parameter design)방식은 기능의 산포를 유발시키는 오차요인을 관리하지 않고, 오차 환경에서도 그 영향을 최소화할 수 있는 최적 설계조건을 찾는 방법이다. 본 연구에서는 히팅 시스템을 동특성으로 분석하기 위해 상기에 기술한 제어인자를 설정하고 신호인자와 잡음인자를 변화시켰을 때, 이들 조합

의 결과로서 수치실험을 실시하면 취출 공기 열용량을 반응 값으로 취하는 변수 설계 방식을 택하였다.

3.2 인자수준 및 직교 배열표

혼합 직교 배열표의 경우 제어인자 들간의 고효작용(interaction)들이 모든 행들에 거의 균등하게 교락 되어 있으므로 다구찌 박사는 로버스트 설계에 L_{18} 직교 배열표의 사용을 강력하게 권장하고 있다. 본 연구에서도 Table 2에 도시한 바와 같이 2수준의 인자 1개와 3수준의 인자 7개인 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 혼합 직교 배열표를 이용하였다. Table 2와 Table 3은 제어인자의 수준과 L_{18} 혼합직교 배열표의 내측 배열을 나타내었다.

Table 2 Level of control factor

Control factor		Level I	Level II	Level III
A	Type of outer fin	Radial	Annular	-
B	Pitch of outer fin	9mm	13mm	17mm
C	Height of outer fin	20mm	30mm	40mm
D	Number of inner fin	12	15	18
E	Clearance between inner fin and flame guide	6mm	9mm	12mm
F	Length of flame guide	45mm	67mm	90mm
G	heating element diameter	$\varphi 90$	$\varphi 100$	$\varphi 110$
H	Clearance between air guide and outer fin	0mm	10mm	17mm

3.3 수치실험방법

본 논문에서는 실험계획법에 의한 최적설계에 기초를 두고 실험은 실제 제품이 아닌 전산유체 해석으로 대체하였다. 본 연구에서는 각 수치실험모델에 대한 반응 특성치를 얻기 위하여 전산유체 해석을 수행하여 히터 유니트 내부요소의 체원 변화가 히팅 시스템의 성능에 미치는 영향을 고찰하였다. 이를 위하여 히터 유니트 내부유동을 3차원 정상상태 난류유동으로 고려하였으며 난류모델로는 Standard k- ϵ 모델을 적용하였다.

3.3.1 해석모델

Fig. 3은 히터 유니트와 전열체 내부 형상을 도시하였다. 본 연구 대상인 히터 유니트는 프리히터의 연소챔버 내부를 통과하는 뜨거운 공기와 송풍기에 의해 강제 순환되면서 전열체 주위를 흐르는 차가

Table 3 Inner orthogonal array

L_{18}	Control factor							
	A	B	C	D	E	F	G	H
R1	1	1	1	1	1	1	1	1
R2	1	1	2	2	2	2	2	2
R3	1	1	3	3	3	3	3	3
R4	1	2	1	1	2	2	3	3
R5	1	2	2	2	3	3	1	1
R6	1	2	3	3	1	1	2	2
R7	1	3	1	2	1	3	2	3
R8	1	3	2	3	2	1	3	1
R9	1	3	3	1	3	2	1	2
R10	2	1	1	3	3	2	2	1
R11	2	1	2	1	1	3	3	2
R12	2	1	3	2	2	1	1	3
R13	2	2	1	2	3	1	3	2
R14	2	2	2	3	1	2	1	3
R15	2	2	3	1	2	3	2	1
R16	2	3	1	3	2	3	1	2
R17	2	3	2	1	3	1	2	3
R18	2	3	3	2	1	2	3	1

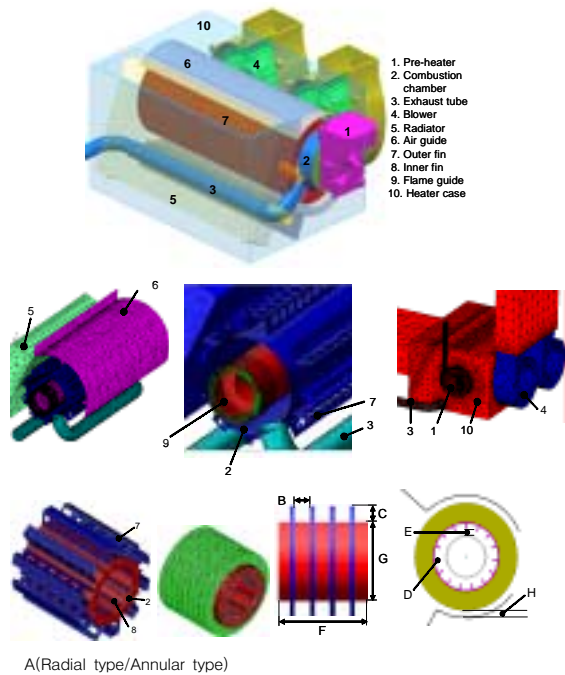


Fig. 3 Heater unit model and fin shape

운 외기가 전열체를 통해 서로 열 교환을 하는 conjugate heat transfer 해석을 수행하였다. 내 외부 핀 모델은 제어인자의 수준변화에 따라 전열체부와 일체화하여 구성하였다. 기체의 물성은 일반공기이며 전열체인 solid의 물성은 알루미늄(AL)으로 밀도와 열전달 계수는 각각 2702kg/m^3 , 237W/mK 로 하였다.

이산화법(discretisation scheme) 은 일차 정확도 상류 차분기법(upwind differencing scheme)을 적용하였고 압력 항 처리는 정상상태 압력 수정 기법인 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 이완계수(relaxation factor)는 속도 항과 난류 항에 대해 0.3을, 압력 항과 온도 항에 대해 각각 0.1과 0.95를 적용하였다. 모델의 크기는 방사형 핀이 부착된 경우 약 90~110 만개 이고 원형 핀이 장착된 경우 약 70~90 만개이다.

3.3.2 다공성매질 모델링

히터 라디에이터 코어 내부에는 냉각수와 공기의 순환 및 열전달을 위해 복잡한 유로와 방열핀 등으로 구성되어 있다. 이러한 코어 내부의 복잡한 기하학적 형상을 실제 형상대로 모사하기에는 많은 시간이 소요되며 해석모델의 크기 또한 증가하여 해석시간이 장시간 소요된다. 그러므로 본 연구에서는 히터 라디에이터를 다공성 매질(porous media)로 처리하여 히터 라디에이터를 통과할 때 발생하는 압력손실을 다음의 식 (1)과 같은 관계식을 통하여 모델링 하였다.

$$K_i = \alpha_i |\vec{v}| + \beta^* \quad (1)$$

여기서 다공성 매질의 특성 값인 α 와 β^* 는 라디에이터 단품의 유량에 따른 압력강하 실험결과를 근거로 하여 구하였으며 α 와 β^* 는 각각 41.7과 347.7이다.

3.3.3 경계 조건 및 초기조건

프리히터 입구부에는 신호인자인 풍량을 유속으로 환산하여 적용하였고 이때의 연소공기의 온도는 1153K로 하였다. 배기 파이프와 실내공기 유입영역은 대기압 조건을 부여하였고 온도 조건은 잠음인자 변화에 따라 258K와 273K로 하였다. 온풍 토출영역에는 송풍기에 의해 흡입되는 조건을 모사하기 위하여 1.6m/sec의 흡입 유속조건을 사용하였고 상기의 적용 값들은 모두 실험을 통해 측정된 값들이다. 히터 유니트 내부의 초기 온도조건은 내부공기 및 전 열체 모두 외기 온도조건과 동일하게 적용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 최적조건 도출

다구찌 실험기법의 수단은 기능 특성치(function characteristics)와 잡음(noise)을 토대로 직교 배열표

를 작성하고 S/N 비(signal-to-noise ratio)를 바탕으로 소규모의 실험을 통하여 고품질 설계 및 원하는 성능을 얻을 수 있는 효과적인 방법이다. 동특성을 고려한 다구찌 설계 방법은 2단계 최적화 기법(two-step optimization)이다. 즉 1단계 최적화에서는 잡음의 영향을 최소화하여 가장 안정된 조건을 찾는 것으로 S/N 비가 큰 수준을 선택하는 것이며, 2단계 최적화에서는 특성의 평균치를 목표값으로 조정하여 성능 최적화를 이루는 것으로 비례계수인 β 를 조정하는 단계이다.

Table 4 Experimental results of orthogonal array

No.	Characteristic value: heat capacity(kcal)					
	M ₁		M ₂		M ₃	
	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂
R1	728	716	867	856	970	954
R2	795	781	1047	1027	1253	1232
R3	940	927	1251	1234	1508	1492
R4	762	749	980	963	1146	1126
R5	552	542	679	659	773	749
R6	1086	1068	1395	1375	1640	1613
R7	883	870	1077	1057	1204	1181
R8	895	880	1097	1080	1245	1224
R9	652	641	839	819	981	952
R10	666	655	870	856	1044	1026
R11	1007	993	1334	1318	1595	1575
R12	774	761	987	973	1147	1128
R13	851	836	1120	1100	1335	1312
R14	788	775	1023	1007	1216	1196
R15	897	886	1174	1157	1395	1375
R16	639	622	819	803	970	946
R17	723	711	926	913	1088	1070
R18	1059	1041	1391	1368	1664	1636

Table 4는 신호인자 및 잡음인자 변화에 따른 각 수치실험 모델의 출력 반응을 나타내었다. Table 4의 출력 반응치는 히터 유니트로 유입된 외기의 온도와 가열되어 취출되는 공기의 평균 온도와의 차이인 ΔT 를 구한 후 열량으로 환산한 것이다. 수치실험 결과 취출되는 공기의 열량은 잡음 조건과 신호인자 변화에 따라 최저 약 550kcal부터 최대 약 1660kcal의 값을 보인다. 취출공기의 온도상승이 가장 큰 모델은 방사형 외부 핀이 부착된 경우 R1 모델이며 원형 핀인 경우 R18 모델이었다.

Table 5 Data conversion process of each experiment

No.	S_T	S_β	S_E	V_E	S/N	β
R1	59857	57819	2038	408	-40.57	0.190
R2	209073	206714	2360	472	-35.65	0.359
R3	324386	321329	3056	611	-34.86	0.447
R4	148193	145097	3096	619	-38.38	0.301
R5	47243	45811	1432	286	-40.04	0.169
R6	307321	302284	5037	1007	-37.30	0.434
R7	104597	99879	4818	964	-41.94	0.249
R8	124490	120970	3520	704	-39.73	0.274
R9	105468	102646	28222	564	-39.48	0.253
R10	141779	140547	1232	246	-34.50	0.296
R11	347425	342521	4904	981	-36.64	0.462
R12	140251	136935	3316	663	-38.93	0.292
R13	234556	231114	3442	688	-36.81	0.379
R14	182062	179825	2237	447	-36.03	0.335
R15	244977	241683	3294	659	-36.42	0.388
R16	109087	107415	1672	334	-37.00	0.259
R17	133095	130938	2158	432	-37.25	0.286
R18	364203	359961	4242	848	-35.79	0.473

18개 모델중 R12, R13, R14 모델의 전열 면적을 비교해 보면 각각 110.5mm^2 , 110.4mm^2 , 90mm^2 으로 R12 모델의 전열면적이 가장 크나 취출되는 공기의 열량은 이 중에서 가장 작게 예측되었다. 그러므로 전열면적이 큰 형상을 갖는 모델이 가장 좋은 성능을 보이는 것은 아니며, 전열면적이 작더라도 설계 변수의 조합조건이 우수할 경우 고 효율의 시스템 설계가 가능함을 볼 수 있다. Table 5는 Table 4에 나타낸 바와 같이 각 조합 조건에 대한 취출 공기 열량 결과로부터 각 제어 인자 수준이 히터 성능에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 S/N 비, 감도계수(β) 등을 계산한 과정을 나타내었다. Table 5에 나타낸 각 변수들의 관계식은 다음과 같다.

- 전체제곱합(S_T) $S_T = \sum_{i=1}^k Y_i^2$ (2)

- 유효 응답수(r) $r = r_0 \sum_{i=1}^k M_i^2$ (3)

- 신호인자의 선형효과 변화(S_β)

$$S_\beta = \frac{1}{r} \left(\sum_{i=1}^k M_i Y_i \right)^2 \quad (4)$$

- 오차변동(S_E) $S_E = S_T - S_\beta$ (5)

- 오차분산(V_E) $V_E = \frac{S_E}{k r_0 - 1}$ (6)

- S/N비(n) $n = 10 \log \left(\frac{1}{r} \left(\frac{S_\beta - V_E}{V_E} \right) \right)$ (7)

- 감도계수(β) $\beta = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^k M_i Y_i$ (8)

여기서 S_T 는 신호인자 조건 변화에 따른 조합수 치실험시 얻은 각각의 출력반응치를 제곱하여 합산한 결과로 총 출력의 제곱합을 의미한다. S_β 는 신호인자의 선형성에 대한 변동이며 S_E 는 오차 변동이고 V_E 는 S/N비의 오차분산을 의미한다. S/N 비는 인자의 수준을 최적화하여 안정된 성능을 갖도록 시스템을 설계하기 위한 도구이며 신호인자 대비 잡음인자의 에너지 비를 의미한다. 즉 S/N 비가 크다는 의미는 신호의 영향력이 크며 동시에 잡음의 영향력이 작다는 뜻이다. 본 연구에서는 신호인자 M_2 를 기준점으로 하여 이 점에서 치우침이 제로가 되도록 기준점을 교정하고 기준점이 제로점인 것으로 간주한 기준점 비례식을 적용하였으며 수식화하면 다음의 식(9)와 같다.

$$Y - Y_s = \beta(M - M_s) \quad (9)$$

여기서 Y_s 와 M_s 는 시스템의 입력신호에 대한 출력반응 관계에서 원점을 의미하고 β 는 시스템의 성능 기울기를 의미한다. Table 6과 Table 7은 Table 5에서 계산된 각 수치실험에 대한 S/N 비와 비례계수를 이용하여 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 혼합 직교 배열표에서 정의되는 각 제어인자의 수준별 S/N 비와 비례계수에 대한 평균값을 도출하였다. 그리고 수준별 효과를 손쉽게 비교하기 위해 Fig. 4와 Fig. 5에 요인 효과도를 도출하였다.

Table 6 Response table of S/N ratio

Level	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-38.66	-36.86	-38.20	-38.12	-38.04	-38.43	-38.68	-37.84
2	-36.60	-37.50	-37.56	-38.19	-37.69	-36.64	-37.18	-37.15
3	-	-38.53	-37.13	-36.57	-37.16	-37.82	-37.03	-37.90

Table 7 Response table of β

Level	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0.297	0.341	0.279	0.313	0.357	0.309	0.250	0.298
2	0.352	0.334	0.314	0.320	0.312	0.336	0.335	0.358
3	-	0.299	0.381	0.341	0.305	0.329	0.390	0.318

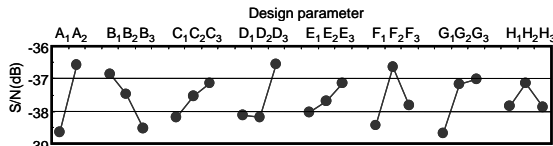


Fig. 4 Factorial effect chart of S/N

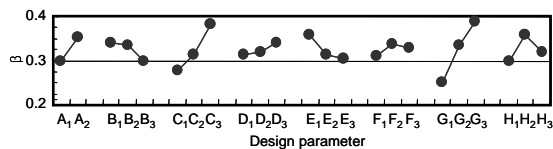


Fig. 5 Factorial effect chart of β

S/N 비를 기준으로 최적 설계조건을 고찰해 보면 각 제어 인자별 S/N 비가 가장 큰 수준을 취하면 되므로 $\langle A_2B_1C_3D_3E_1F_2G_3H_2 \rangle$ 가 최적 조건임을 알 수 있다. 또한 β 를 기준으로 삼을 경우에도 가장 큰 값을 선택해야 한다. 이는 식 (9)에 도시한 바와 같이 β 가 증가하면 시스템에 가해지는 신호인자 대비 출력반응치가 증가하므로 결국 시스템의 성능 향상을 도모할 수 있음을 의미한다. 그러므로 β 를 기준으로 한 최적 설계 조건은 $\langle A_2B_1C_3D_3E_1F_2G_3H_2 \rangle$ 으로 판단할 수 있다. S/N 비와 β 를 기준으로 선정된 각 최적 조건을 비교해 보면 외부 편 형상인 A 인자의 경우 A_2 수준이 S/N 비 및 β 계수 모두 공통적으로 높게 나타나 A_2 가 오차의 편차를 줄이면서 시스템의 성능 향상에 기여함을 알 수 있다. 마찬가지로 외부 편 피치인 B 인자, 외부 편 높이인 C 인자, 내부 편 수인 D 인자, 화염 가이드 길이인 F 인자, 연소통 직경인 G 인자, 에어 가이드 간극인 H 인자는 각각 $B_1, C_3, D_3, F_2, G_3, H_2$ 수준이 공통적으로 우수하게 나타나 $B_1, C_3, D_3, F_2, G_3, H_2$ 수준을 최적 조건으로 도출할 수 있다. 하지만 내부 편과 화염가이드 사이의 간격인 E 인자는 E_3 와 E_1 수준이 동시에 선택되어 산포 감소를 위해서는 오차 편차 발생이 적은 E_3 수준을, 성능을 우선적으로 고려해 볼 때는 E_1 을 선택하는

것이 더 바람직하다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 $\langle A_2B_1C_3D_3E_1F_2G_3H_2 \rangle$ 수준을 최적 조건으로 선정하여 시스템의 성능을 우선적으로 고려하였다.

Table 8 Result of confirmation experiment

Condition	Set of factor	Heat capacity(kcal)						S/N	β
		M ₁		M ₂		M ₃			
		N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂		
Base(R4)	$A_1B_1C_1D_1$ $E_2F_2G_3H_3$	762	749	980	963	1146	1126	-38.4	0.3
Optimum	$A_2B_1C_3D_3$ $E_1F_2G_3H_2$	1268	1247	1686	1659	2037	1999	-35.2	0.6

4.2 확인 실험

L_{18} 혼합직교 배열표에 의한 수치실험 결과로부터 도출된 최적 조건에 대한 재현성을 확인하고자 최적 조건인 $\langle A_2B_1C_3D_3E_1F_2G_3H_2 \rangle$ 를 만족하는 해석 모델을 생성하여 확인 실험을 수행하였다. Table 8에 나타난 S/N 비와 β 계수는 앞 절에 도시한 계산과 정과 동일하게 식 (7)과 식 (8)로부터 구하였다. Table 8에 도시한 바와 같이 기본모델 대비 최적 조건의 S/N 비와 β 계수 모두 크게 나타났다. S/N 비의 경우 약 3.2dB 정도 개선되고 β 계수는 약 2 배 정도 향상되어 최적 조건이 히터 성능 향상을 도모할 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 성능검증 결과 및 고찰

본 절에서는 다구찌 기법과 전산유체해석을 통해 도출한 최적조건의 성능 평가를 위하여 기본사양과 최적사양에 대한 히터 시스템을 제작한 후 단품실험과 실차 실험을 수행하였다. 실차 실험의 경우 아이들(Idle) 정차 모드 조건과 40kph 저속 주행 모드 조건에서 난방 속효성 실험을 수행하였다.

5.1 단품 제작 및 실험방법

연소챔버와 연소 챔버에 부착되는 내부 및 외부 편 등은 AL으로 제작하였고 배기관은 steel을 에어 가이드와 버너 고정판 등은 scp로 제작하였다. Fig. 6은 전열체 완성품을 도시하였다. Fig. 7에 도시한 바와 같이 히터 유니트에 설치된 흡입형 송풍기의 구동에 따라 유니트 상면에 위치한 흡입구를 통하여



Fig. 6 Pre-heater specimen

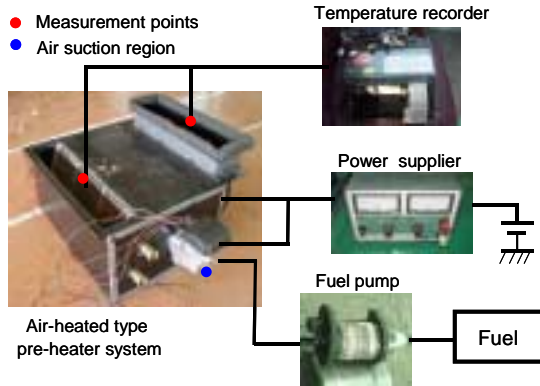


Fig. 7 Schematic diagram of experiment apparatus

외기가 유입되고 히터 유니트 내부에 있는 열교환기를 통하여 공기는 가열된다. 또한 가열된 공기는 히터 유니트 상면에 위치한 배출구를 통해 객실 난방공간으로 강제 방출된다. 연소팬 에셈블리는 연소팬, 공기 유입구, 연료 유입구, 워터펌프 등으로 구성되며 연소팬에 의해 연소를 위한 공기가 흡입된다. 또한 버너 어셈블리는 기화기, 글로우 플러그 그리고 공기가 직접 공급되는 하우스징으로 구성되며 점화시 연료펌프에 의해 연료 유입구로 연료가 공급되면서 히터가 작동하게 된다.

최적사양을 적용한 공기 가열식 프리히터의 난방 속효성능 평가시 히터 팬 풍량 조건은 실차 상태 최대 풍량의 1/4배인 250m³/h로 일정하게 공급되도록 제어하였다. 버너 연료 공급량은 점화 초기부터 2분 동안 선형적으로 증가시켜 점화 초기 매연 발생을 억제하도록 하였으며 2분 이후 최대 공급 연료량인 0.6 ℓ/h로 공급되도록 하였다. 히터시스템의 열출력을 구하기 위하여 흡입되는 외기온도 및 열원에 의해 가열된 배출공기의 온도를 각각 열전대(thermo couple)를 사용하여 시간에 대한 연속적인 변화 값으로 측정하였고 이때 측정 위치들은 정확한 평균 온도 값이 계산되도록 유동단면에서 균등분할 면적에 따라 4개의 지점을 선정하였다.

5.2 단품 성능 평가

최적화 단계에서 도출한 최적안과 기본안에 대한 성능 비교 실험을 수행하였다. Fig. 8은 외기온이 2°C이고 히터 팬 풍량을 420m³/h로 제어한 경우 유입구와 토출구의 온도차를 도시 하였다. 히터 시스템을 5분 동안 가동후 측정된 결과로서 최적안의 온도 상승 값이 약 30.2°C로 기본안에 비해 약 83% 정도 높게 나타났다. Fig. 9는 히터 팬 풍량을 250m³/h로 일정하게 제어한 경우 최적조건에 대한 난방 속효성능 실험결과를 도시하였다. 개발 목표로 설정한 토출 공기의 온도와 유입되는 외기 온도의 온도차가 32°C에 도달하기 위해 히터 가동 후 약 3.8분 소요되며 연소 챔버 내부 표면 온도가 약 500°C에 도달하는데 약 6.5분 정도 소요되었다.

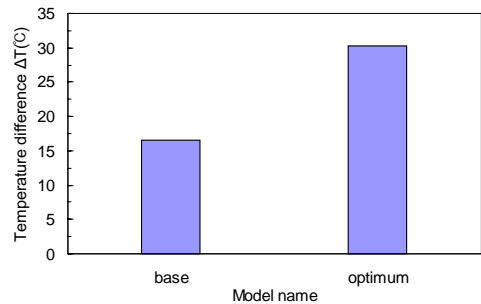


Fig. 8 Experimental comparison between base design and optimum design

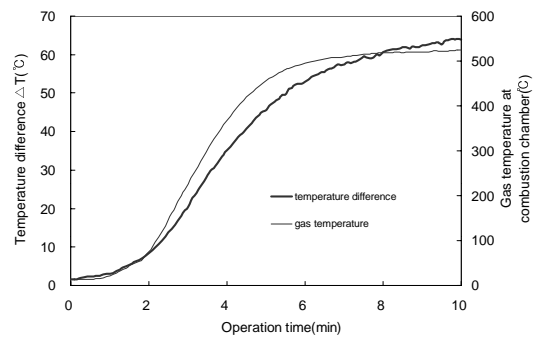


Fig. 9 Experimental results of warm-up performance

5.3 실차 성능 평가

5.3.1 모드별 실험조건

최적화된 공기 가열 프리히터가 적용된 차량과 냉

각수 가열 프리히터가 장착된 기존차량에 대한 실차 비교실험을 수행하였다. 실차 성능 평가는 아이들 정차모드와 40kph 저속주행 모드의 두 조건에서 수행하였으며 아이들 정차모드와 40kph 저속 주행모드시 외기 온도 조건은 각각 -4°C와 -7°C였다.

아이들 정차모드의 경우 히터 풍량은 초기 최저단에서 온풍 32°C 토출 시점부터 최고단으로 설정하여 20분 동안 진행하였으며 40kph 저속 주행모드의 경우 초기 아이들 30분 후 20분 동안 40kph 저속 주행을 하였고 이때의 히터 풍량 조건은 초기 아이들시 최저단음, 저속 주행시 최고단으로 하였다.

히터 유닛이 차량에 장착된 상태의 난방 속효성 평가를 위해 히터 유닛 온풍 토출구와 가장 근접한 위치에 놓인 RH 히터 덕트 no.3 토출구에서 온도를 측정하였고 차량 실내 평균 온도를 구하기 위하여 각 시트에서 온도를 측정하였다. Fig. 10은 히터 유닛의 실차 장착 상태를 도시하였다. 히터 유닛은 전륜 타이어와 화물상 사이에 장착된다.

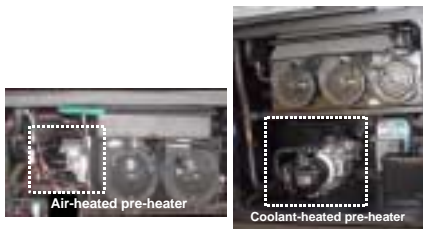


Fig. 10 Comparison of heater unit configuration

5.3.2 아이들 정차모드 실험 결과

Fig. 11에 도시한 바와 같이 최적화된 공기 가열식 히터 시스템의 정차 아이들 조건에 대한 난방 속효성 실험 결과, 목표로 삼은 토출 온풍 32°C 도달시간이 최적사양은 4분 소요되었으며 기존 사양은 13.2분 소요되어 기존 사양 대비 약 3배 이상 향상됨을 확인하였다. 단품성능 실험결과에 비해 목표온풍 도달 시간이 약 0.2분 정도 더 소요되었다.

이는 실차 실험 조건시 토출 온풍 측정위치를 덕트 토출구 no.3으로 하였으므로 히터 유닛에서 토출되는 온풍이 덕트 토출구 no.3에 이르기까지 열손실이 다소 발생하기 때문으로 판단된다. 실내 평균 온도 또한 프리히터 작동 후 약 4분 시점부터 최적 사양이 전반적으로 높게 나타남을 볼 수 있다. 약 14

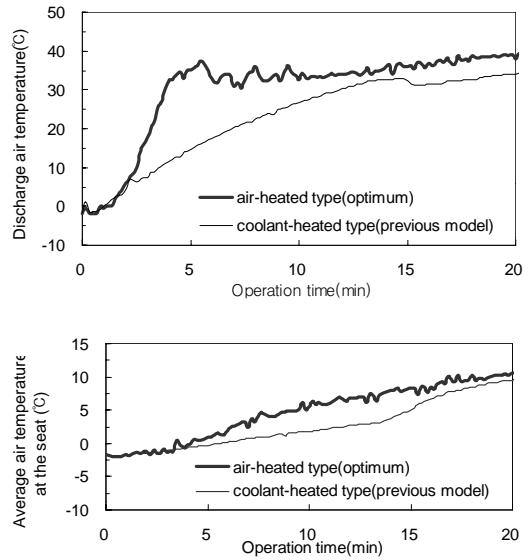


Fig. 11 Experimental results under idle mode condition

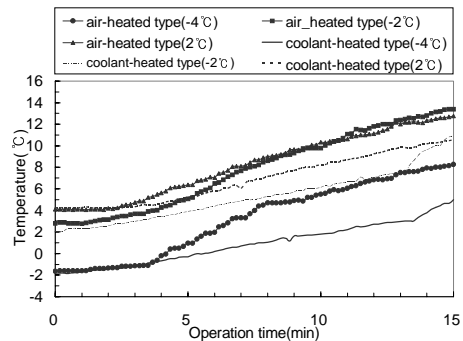


Fig. 12 Averaging temperature at the seat with respect to the variation of ambient air temperature

분 시점에서 최적사양의 경우 7.5°C, 기존사양은 3°C로 최대 4°C 우세한 것으로 나타났으며 시간이 흐를수록 그 차이는 다소 감소하였다.

Fig. 12는 외기온 변화에 따른 객실 내부 평균 온도변화를 도시하였다. 외기온이 -4°C, -2°C인 경우에는 히터 팬 풍량을 초기 최저단에서 32°C 도달 시점부터 최고단으로 설정하였다.

외기온이 2°C인 경우는 초기부터 유입 풍량을 히터 최대 풍량의 약 1/2로 일정하게 제어하였다. Fig. 11의 결과와 유사하게 전반적으로 약 4분 시점부터 외기온 변화조건에 관계없이 최적화된 공기 가열식

히터를 적용한 차량이 우위를 보임을 볼 수 있으며 풍량이 증가함에 따라 8분 시점까지 실내 평균 온도의 차이는 보다 크게 나타났다. 냉각수 가열 방식을 적용한 차량의 경우 실내 평균 온도는 약 13분까지는 완만하게 증가하다가 13분 이후 급격하게 증가함을 볼 수 있다. 즉 시동 후 약 13분 시점에서 히터 토출구의 온풍 온도가 목표 온풍인 32°C에 도달하는 것을 의미하며 이때 풍량의 급격한 증가로 실내 평균 온도가 급격하게 상승함을 의미한다.

5.3.3 40kph 주행모드 실험 결과

40kph 저속 주행모드 실험결과를 Fig. 13에 도시하였다. 기존 냉각수 가열방식은 냉각수온을 감지하는 방식으로 온풍 온도가 57°C에 도달하면 프리히터의 작동이 멈추고 52°C에 이르르면 재차 작동하도록 되어 있다. 하지만 본 연구에서 개발한 공기 가열 방식은 화재 안전성을 고려하여 연료량 가변제어를 통해 토출 온풍을 65°C로 일정하게 유지 가능하므로 주행 중 덕트 토출 온풍은 43분 시점에서 최대 약 9°C 정도 우수하였다. 40kph 주행모드의 경우 정차 아이들 시간이 짧을 경우 기존사양 대비 효과는 더 클 것으로 판단된다. 승객실 평균온도 또한 냉각수 가열 방식의 프리히터 작동이 멈춘 시점까지 동등한 수준이나 그 이후 약 1.9도 높게 나타남을 볼 수 있다.

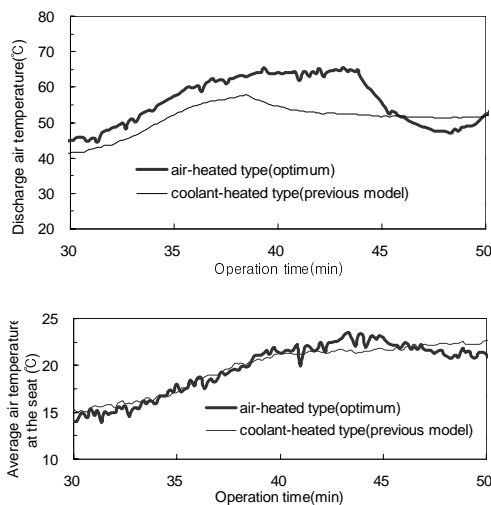


Fig. 13 Experimental results under driving mode condition

6. 결론

공기 가열식 히터 시스템의 난방 속효 성능 최적화를 위해 제어인자를 선별한 후 전산 유체 해석 기법을 이용하여 동특성을 고려한 다구찌 수치실험과 단품 및 실차 검증 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

제어인자의 최적 조건 선정시 S/N 비와 β 계수가 공통적으로 높게 나타난 $A_2, B_1, C_3, D_3, F_2, G_3, H_2$ 수준을 선정하였고 E 인자의 경우 성능향상을 최대화하기 위해 S/N 비가 다소 감소하더라도 β 계수가 최대 값을 나타내는 E_1 수준을 최적조건으로 선정하였다. CFD 해석을 통해 최적조건 $\langle A_2 B_1 C_3 D_3 E_1 F_2 G_3 H_2 \rangle$ 에 대한 재현성을 확인한 결과 기본 모델 대비 S/N 비는 3.2dB 증가하였고 β 계수는 약 2배 정도 향상되었다.

최적안에 대한 난방 속효 성능 실험결과 목표 토출온에 도달하기 위해서는 히터 가동 후 약 4분 정도 소요되며 기존 냉각수 가열방식 대비 난방 속효 성능이 약 9분 이상 향상되었다. 실내 평균온도 또한 프리히터 작동 후 약 4분 시점부터 최적사양이 전반적으로 약 2°C에서 4°C 정도 높게 나타났다.

References

- 1) H. S. Hu, D.C. Huang, C. Wojdyla, "A Transient Computer Aided Engineering Model for Automobile Heater System Design," SAE 2000-01-1274, 2000.
- 2) D. Huang, H. Hu, C. Wojdyla, "Development of a Computer-Aided Engineering Tool for Automotive Heater System Design and its Applications," SAE 2001-01-1757, 2001.
- 3) A. P. Tsantis, J. S. Brown, R. J. Hutter, and P. M. Lyon, "Improvements in Heater, Defroster and Emission Performances Using a Latent Heat Storage Device," SAE 940089, 1994.
- 4) G. D. Mandrusiak and A. C. Alkidas, "Impact of Engine Design on Vehicle Heating System Performance," SAE 971839, 1997.
- 5) J. Kim, H. Kim, J. Park, Y. Yoo, S. Kim, Y. Ahn, "A Study on Performance of PTC Heater by Fuel Injection System," 2002 KSAE Spring

- Conference Proceedings, pp.1062-1067. 2002.
- 6) C. Kelly and L. Kachatorian, "Robust Design for Six Sigma Manufacturability," SAE 961268, 1996.
- 7) C. Hsich, "Automotive Applications Using A Robust Design Approach," SAE 1999-01-1029, 1999.