

실험계획법을 이용한 고효율 소형 열병합 시스템 성능 해석

류미라¹⁾ · 이준식²⁾ · 박정호³⁾ · 이성범⁴⁾ · 이대희⁴⁾

인제대학교 BK21미래형 자동차사업팀¹⁾ · 인제대학교 기계자동차공학부²⁾ · 창원 문성대학 자동차 기계학부³⁾ ·
인제대학교 기계자동차공학부 고안전 차량 핵심 기술연구소⁴⁾

Performance Analysis of High Efficiency Co-generation System Using the Experimental Design Method

Mira Ryu¹⁾ · Junsik Lee²⁾ · Jeongho Park³⁾ · Seongbeom Lee⁴⁾ · Daehee Lee⁴⁾

¹⁾BK21 Advanced Vehicle Core Parts Research Group, Inje University, Gyeongnam 621-749, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Inje University, Gyeongnam 621-749, Korea

³⁾Division of Automotive & Mechanical Engineering, Changwon Moonsung University, Gyeongnam 641-771, Korea

⁴⁾School of Mechanical and Automotive Engineering/High Safety Vehicle Core Technology Research Center,
Inje University, Gyeongnam 621-749, Korea

(Received 9 September 2010 / Revised 18 April 2011 / Accepted 9 November 2011)

Abstract : As a kind of distributed energy system, the co-generation system based Diesel engine using after-treatment device was devised for its environmental friendly and economic qualities. It is utilized in that the electric power is produced by the generator connected to the Diesel engine, and waste heat is recovered from both the exhaust gases and the engine itself by the finned tube and shell & tube heat exchangers. An after-treatment device composed ceramic heater and DOC(Diesel Oxidation Catalyst) is installed at the engine outlet in order to completely reignite the unburned fuel from the Diesel engine. In this study, mutual relation of each experimental condition was derived through minimum number of experiment using Taguchi Design and ANOVA recently used in the various fields. It is found that the total efficiency (thermal efficiency plus electric power generation efficiency) of this system reaches maximum 94.4% which is approximately higher than that of the typical diesel engine exhaust heat recovery system.

Key words : Co-generation system(열병합 시스템), After-treatment device(후처리 장치), Diesel engine(디젤 엔진), Taguchi design(다구찌 기법), ANOVA(분산분석법)

1. 서론

일반적으로 열병합 시스템(CGS: Co-Generation System)이란 내연기관, 가스터빈, 연료전지, 스팀링 엔진 등 각종 원동기에 의해 연료가 가진 화학에너지를 전기에너지로 변환 생산하고 이때에 수반되는 폐열 에너지를 재활용하여 난방을 하는 고효율의 에너지 시스템으로 기존의 에너지 시스템 방식에 비하여 시스템의 효율이 2배 이상 높은 장점이 있

다. 뿐만 아니라 지구 온난화에 큰 영향을 끼치는 CO₂의 배출량을 획기적으로 줄일 수 있는 친환경 기술로서 각국에서 도입을 활발히 추진하고 있다.^{1,2)} 1998년도 잠실롯데월드에서의 첫 도입이래 2009년말 현재 국내에 설치된 소형 가스열병합발전 시스템은 아파트, 산업체 및 업무용 빌딩 등 191개소(364대)에 약 213MW가 설치되어 있다. 2013년까지 2,700MW를 보급하기 위한 목표를 세우고 있다.³⁾

대부분의 나라에서 기존의 내연기관 엔진을 이용한 열병합 시스템의 폐열 회수에 관한 연구에도 불

*Corresponding author, E-mail: mechdhl@inje.ac.kr

구하고 발전효율이 20~40%, 열효율이 60~40%로 총 효율(발전효율+열효율)이 최대 80%를 넘지 못하고 있는 실정으로 고유가 시대에 보다 높은 효율의 열병합 시스템 개발이 절실하다. 따라서, 본 연구에서는 내연기관 엔진의 배기구에 전열선(Nichrome-Embedded Ceramic Heater)을 이용한 후처리장치를 부착하여 엔진에서 배출되는 불완전 연소가스를 재연소 시킴으로써 기존의 열병합 시스템에 비해 열효율을 향상시키고자 한다. 이처럼 열효율을 향상시키기 위한 조건을 제시하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소요하여 실험을 하고 시행착오를 겪고 있는 실정이다. 따라서 최소의 실험으로 각 실험조건들의 상관관계를 제시하기 위하여 최근 다양한 분야에 널리 사용되고 있는 실험계획법의 도입이 필요하다.⁴⁾

본 연구에서는 열병합 시스템 실험에 다구찌 기법과 분산분석법을 적용한 실험계획법을 이용하여 최적의 실험조건과 각 실험조건에 대한 분석을 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 열병합 시스템

열병합 시스템은 Fig. 1과 같이 주 동력원으로 930cc 디젤엔진, 12kW 발전용량의 발전기, 후처리장치, 각-관열 교환기, 핀-튜브타입 열교환기로 구성되어있고, 이를 Fig. 2로 나타내고 있다. 여기서, 각-관 열교환기는 엔진의 냉각 및 엔진에서 발생하는 폐열 회수를 위해, 핀-튜브타입 열교환기는 엔진 배기부에서 발생하는 배기가스의 폐열 회수를 위해 시스템 내부에 적절히 배치하였다. 또한, 시스템에서 발생하는 전력을 회수하기 위하여 DOC와 여러 가닥의 니크롬 열선이 장착된 Ceramic 히터로 구성되어있는 후처리장치를 엔진배기구 후미에 장착하였다. 그리고 배기가스 저감 및 열교환기를 통해 최종적으로 배출되는 온수의 온도를 높여 열효율을 더욱 향상하고자 하였다. 각 입출의 온도 측정은 K-type 열전대를 사용하여 실시간으로 측정하였다. 시스템에서 생산되는 전력량은 삼상 전력 측정기를 통하여 kW 단위로 측정하였다.

특히, 시스템에서 발전된 전력의 일부를 이용하

여 후처리장치 내부의 니크롬 열선에 0.5, 1.0, 1.5kW 단위로 부하를 줄 수 있게 하였다. 엔진 배기가스가 700°C 이상의 니크롬열선에 직접 접촉하는 과정에서 배기가스의 PM(Particulate Matter)이 재연소하게 된다. 그 결과, PM량은 감소하고 PM이 재연소하는 과정에서 발생하는 높은 열에너지는 시스템의 효율을 향상시킬 수 있는 에너지원이 된다. 그러나, 이와 동시에 PM과 Trade-off 관계에 있는 NOx량이 증가하는데, 이에 대한 대안으로 DOC를 설치하여 유해물질인 탄화수소(HC), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx) 등 매연 입자상 물질과 용해성 유기물질을 인체에 무해한 H₂O, CO₂, N₂로 정화시키거나 저감시키고자 한다.

2.2 효율해석

본 열병합시스템의 효율을 측정하기 위하여 시스템이 정상상태에 도달하기 까지 충분히 예열을 한 후, 연료의 사용량과 시스템으로 유입되는 난방수의 온도변화, 그리고 발전을 통해 생산되는 전력량을 실시간으로 측정하여 시스템의 열효율, 발전효율, 전체 효율을 식 (2) - (4)와 같이 계산하였다.

$$Q_{H_2O} = \dot{m}c_p(T_o - T_i) \quad (1)$$

여기에서, Q_{H_2O} 는 디젤엔진의 배기가스의 폐열과 엔진자체의 열을 회수한 총열량이다. 그리고 \dot{m} 과 c_p 는 각각 시스템으로 유입되는 냉수의 유량과 비열, T_i 과 T_o 은 각각 난방수의 입구 및 출구온도이다. 그리고 시스템의 열효율(η_{th})을 다음과 계산할 수 있다.

$$\eta_{th} = \frac{Q_{H_2O}}{Q_{diesel}} \times 100\% \quad (2)$$

여기에서, Q_{diesel} 은 시스템에 공급되는 연료의 총열량으로 공급된 연료의 질량과 저위발열량의 곱으로 산출된 값이다. 한편, 시스템의 발전효율은 (η_{elect}) 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\eta_{elect} = \frac{Q_{elect}}{Q_{diesel}} \times 100\% \quad (3)$$

여기에서, Q_{elect} 은 발전기를 통하여 생산되는 전

력량에서 후처리장치의 니크롬선의 열선에서 소요 되는 전력량을 뺀 값이다.

이제, 본 열병합시스템의 전체효율(η_{total})은 열효율과 발전효율의 합으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\eta_{total} = \frac{Q_{H_2O} + Q_{elect}}{Q_{diesel}} \times 100\% \quad (4)$$

2.3 다구찌 기법

본 연구에서 각 인자의 수준은 실제 입력인자의 실험조건을 변환하여 4수준으로 하였으며 시뮬레이션 수행은 각 조건에서 한 번만 수행하였다. 잡음 인자에 강인한 설계를 하기 위하여 신호 대 잡음비(S/N ratio)를 분석하여 이때 각 인자의 수준에 따른 S/N비 값이 클수록 최적조건임을 알 수 있다. 본 연구에서는 특성치인 총 효율을 최대화하기 위하여 망대특성으로 분석하였으며, S/N비는 식 (5)에 의해서 계산된다.⁵⁾

$$S/N = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (5)$$

여기서, n 은 사용조건이고, y_i 는 품질특성 값이다.

2.4 분산분석법

분산분석은 실험계획법에서 가장 많이 사용되는 분석방법으로 실험에 의하여 얻어지는 데이터 분석에는 분산분석이 그 밑바탕을 이루고 있다. 분산분석이란 특성치의 산포를 제공함으로 나타내고 이 제공함을 실험과 관련된 요인마다의 제공함으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석 방법이다. 각 요인의 제공함을 그 요인의 자유도로 나누면 그 요인의 제공평균이 되며 오차분산에 비하여 얼마나 큰가를 검토하게 된다. 따라서 분산분석이란 특성치의 산포를 요인별로 분해하여 어느 요인이 큰 산포를 나타내

고 있는가를 규명하는 방법이라고 할 수 있다.

Table 1은 분산분석 표를 나타내고 있는데 여기서, S 는 최소 제곱법에 의한 오차 제공의 합, ϕ 는 자유도로 제공을 한 편차의 개수에서 편차들의 선형 제약조건의 개수를 뺀 값이다. V 는 평균제공이다. 잔차 평균제공 MSE는 $\hat{\beta}_i$ 과 \hat{y} 의 분산이 많이 쓰이고 있다. 먼저 중회귀모형의 분산분석에 의한 정도의 측정은 총 변동은 SST로, 회귀에 의하여 설명되는 회귀변동은 SSR로, 그리고 나머지 잔차 변동은 SSE로 나타낸다.

Table 1은 F_0 와 P 검정을 통하여 검증을 하는데 본 연구에서는 P 검정을 사용하였다. P 검정은 교호작용이라고도 하는데 교호작용이란 두 개 이상의 인자에 대해 각각의 기준을 조합하였을 때 생기는 효과로 통계학자들이 제안한 값이다. 그 값이 0.05 이하이면 다구찌 기법이 유효하다는 것을 알 수 있다.

또 분산분석법의 정도를 측정하는 방법으로 많이 사용되는 것은 결정계수(coefficient of determination)로서 R^2 으로 나타내고 식 (6)에 의하여 구한다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (6)$$

$0 \leq R^2 \leq 1$ 의 범위에 있고 R^2 의 값이 1에 가까울수록 높은 정도를 갖는다.^{6,7)}

3. 실험 조건 및 방법

디젤엔진 열병합 시스템의 최적화 조건을 판단하기 위해 본 연구에서는 시스템의 열효율(thermal efficiency), 발전 효율(electric power generation efficiency), 전체 효율(total efficiency)을 Table 1의 실험조건으로 시스템의 최적 작동 조건을 결정하였다. 데이터 수집 시 발생할 수 있는 오차를 최소화하기 위해 시스템이 충분히 정상상태에 도달하였을 때 시스템의 효율을 측정하였다.

Table 1 ANOVA of multiple regression

Factors	S	ϕ	V	F_0	P
Regression	$SSR = \hat{\beta}' X' y - n(\bar{y})^2$	k	MSR	$\frac{MSR}{MSE}$	$F(k, n-k-1; \alpha)$
Residual	$SSE = y' y - \hat{\beta}' X' y$	$n-k-1$	MSE		
Total	$SST = y' y - n(\bar{y})^2$	$n-1$			

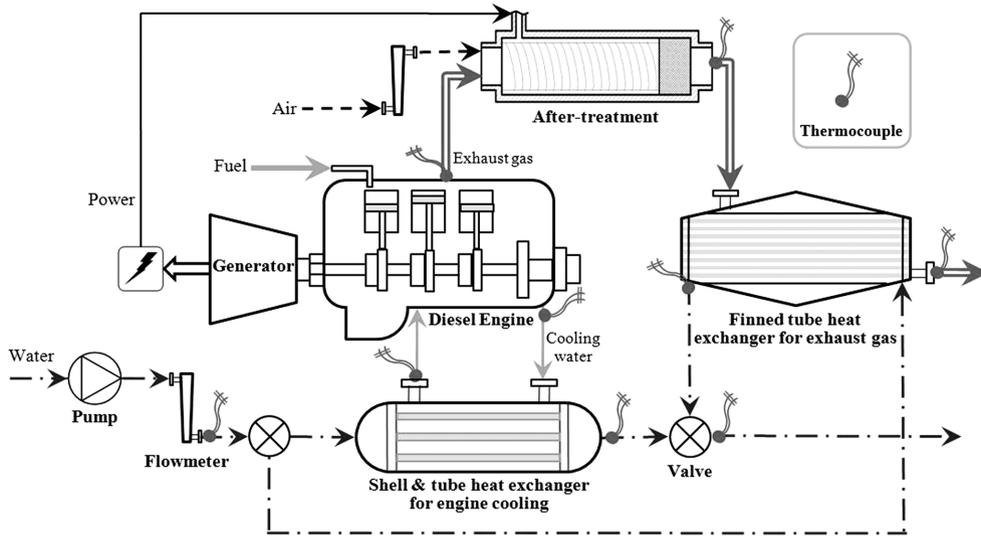


Fig. 1 Schematic diagram for the performance test of the engine boiler system

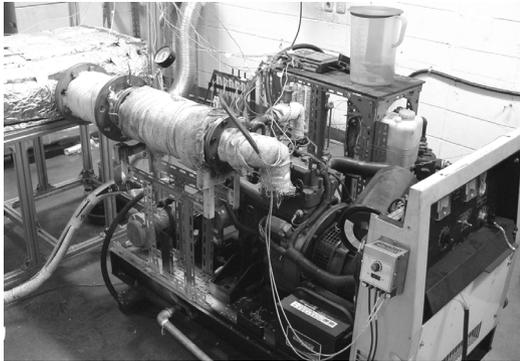


Fig. 2 A photograph of the diesel engine boiler system

Table 2 Control factors and level

	1	2	3	4
Ceramic heater load (kW)	0	0.5	1.0	1.5
Electric power output (kW)	3	5	7	9
Water flow rate (LPM)	5	10	15	20

본 연구에서의 실험조건은 Table 2와 같이 3인자4 수준의 $L_{16}(4^3)$ 직교배열표와 같이 설정하였으며, 3인자 실험변수는 열병합 시스템에 주입해주는 전기하중, 열병합 시스템에서 발생하는 전력량, 유량이다.

4. 결 과

열병합 시스템 실험의 조건들은 비선형성이 매우

크므로, 많은 표본점이 필요하다. 게다가 실험변수의 수가 증가할 때는 더 많은 표본점이 추가된다.

본 연구에서 열병합 시스템에 주입해주는 전기하중, 열병합 시스템에서 발생하는 전력량, 유량을 실험변수로 선정하였다. 실험조건은 Table 3과 같이 실험 장치에서 요구되는 범위 한계 내에서 설정하여 직교배열표로 나타내었고 실험한 결과에 따른 총효율도 나타내었다.

Fig. 3은 MINITAB을 사용하여 다구찌 방법을 적용시킨 결과 S/N비를 나타낸 것으로 기울기가 클수록 총효율에 많은 영향을 미치는데 열병합 시스템에 주입해주는 전기하중, 유량, 열병합 시스템에서 발생하는 전력량 순으로 총 효율에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한, 각각에서 총 효율이 가장 높은 조건으로 열병합 시스템에 주입해주는 전기하중 0.5kW, 열병합 시스템에서 발생하는 전력량 9kW, 유량 20LPM이라는 것을 알 수 있으며, 실험 결과 총 효율이 94.4%를 나타내었다. 이것이 열병합 시스템의 총 효율에 대한 최적 조건이라고 사료된다. 이는 시스템의 발전량이 증가함에 따라 연료의 소비량이 늘어나게 되고, 결과적으로 열교환기를 통한 연료의 연소과정에서 일어나는 회수 가능한 유효 열에너지가 발전량 9kW, 유량이 20LPM 일 때 최고점이 됨을 뜻한다.

Table 3 Arrange table and total efficiency ($L_{16}(4^3)$)

No.	Ceramic heater load (kW)	Electric power output (kW)	Water flow rate (LPM)	Total efficiency (%)
1	0.0	3	5	61.6
2	0.0	5	10	69.1
3	0.0	7	15	79.3
4	0.0	9	20	82.7
5	0.5	3	10	85.7
6	0.5	5	5	71.0
7	0.5	7	20	93.5
8	0.5	9	15	90.6
9	1.0	3	15	81.4
10	1.0	5	20	84.7
11	1.0	7	5	74.1
12	1.0	9	10	83.5
13	1.5	3	20	84.8
14	1.5	5	15	83.7
15	1.5	7	10	81.2
16	1.5	9	5	72.9
Opt.	0.5	9	20	94.4

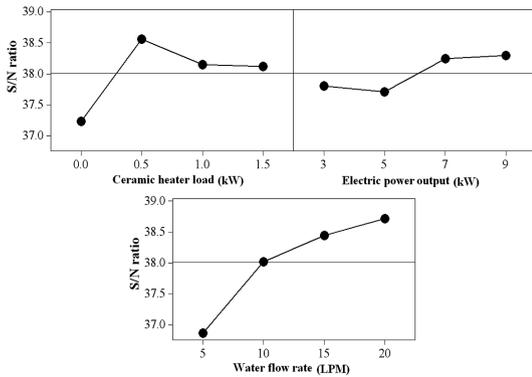


Fig. 3 SN ratio tower characteristics

Table 4는 분산분석 결과를 나타낸 것인데, P 값이 0.05보다 작은 값이 목적치에 많은 영향을 미치는 인자로서 모든 조건들이 목적치인 총 효율에 영향을 미치는 인자라는 것을 알 수 있다.

또, 결정계수가 85% 이상이면 망대특성을 가진 다구찌 방법을 신뢰할 수가 있는데 본 연구에서는 결정계수가 식 (6)의 계산에 의하여 98.03%를 나타내고 있으므로 신뢰성이 양호하다는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서 Fig. 6은 정규성 그래프로서 실험이 제대로 되었는지를 한눈에 검토하는 그림이다. 그중

Table 4 Analysis of variance table

Source	ϕ	S	V	F	P
Ceramic heater load (kW)	3	299.59	99.86	29.48	0.001
Electric power output (kW)	3	83.55	27.85	8.22	0.015
Water flow rate (LPM)	3	629.47	209.82	61.94	0.000
Error	6	20.32	3.39		
Total	15	1032.94			

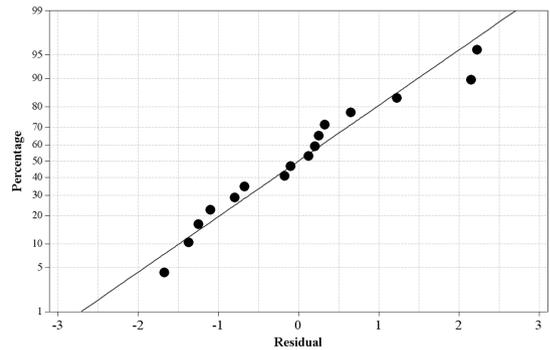


Fig. 4 Normal probability plot of the residuals

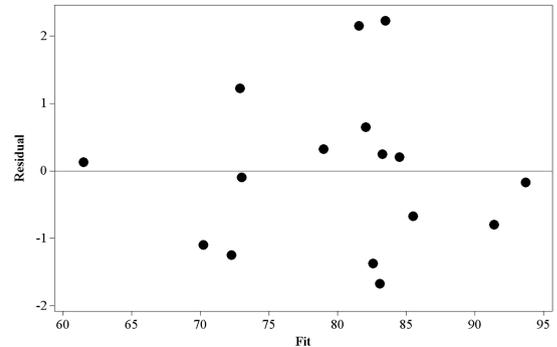


Fig. 5 Residuals versus the fitted values

Fig. 4는 잔차(residual)의 분포상태가 일직선에 가까운 정규분포를 하고 그래프로서 선형그래프를 따라 선형적으로 분포하면 잔차의 분포상태가 일정한 정규성을 띄고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 잔차와 실험 결과인 열병합 시스템의 총효율과의 적합치를 나타내고 있는데 특별한 형태가 띄지 않고 넓게 분포되어 있으므로 오차는 랜덤한 것을 알 수 있고, Fig. 6은 데이터 순서에 따른 잔차 그래프로 분포상태가 특별한 형태를 띄지 않고 넓게 분포되어 있는 것으로 보아 잔차가 독립적인 것을 알 수 있다. Fig. 7

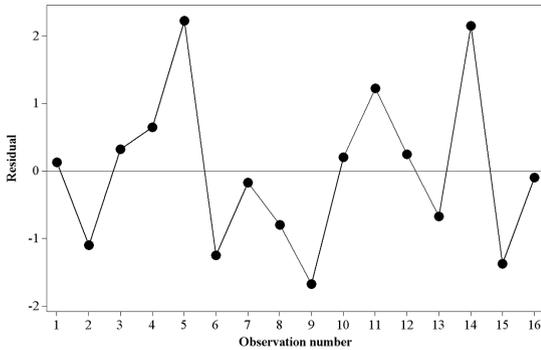


Fig. 6 Residuals versus the observation number

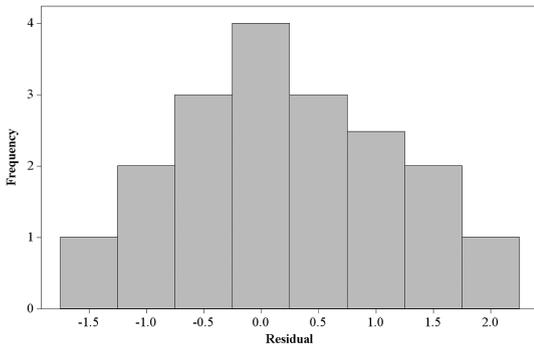


Fig. 7 Histogram of residuals

은 히스토그램 그래프로서 종모양을 이루고 있으면 정규성을 띄고 있다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 930cc 디젤엔진을 이용한 열병합 시스템을 도입하여 시스템 내부에 설치된 엔진폐열 회수 열교환기, 배기가스 폐열회수 열교환기 및 후처리장치를 이용하여 시스템의 효율향상을 위한 실험을 다구찌기법과 분산분석법을 통하여 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 열병합 시스템 실험에서 총 효율에 가장 많은 영향을 미치는 인자의 순서는 열병합 시스템에 주입해주는 전기하중, 유량, 열병합 시스템에서 발생하는 전력량인 것을 알 수 있다.
- 2) 최대의 총효율을 위한 최적 조건은 열병합 시스템에 주입해주는 전기하중 0.5kW, 열병합 시스템에서 발생하는 전력량 9kW, 유량 20LPM이다.

- 3) 다구찌 방법을 이용한 최적조건에 의해 실험한 열병합 시스템의 총효율은 94.4%를 나타내었으며, 평균 총효율 79.99%에 비하여 약 18% 증가한 것을 알 수 있었다.
- 4) 분산분석법의 결정계수가 98.03% 나타내고 있으므로 신뢰성이 양호하다는 것을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2010-0017128).

References

- 1) Korea Energy Management Corporation, Guide of Measurement and Validation on Energy Conservation Possibility about Small Cogeneration System, 2006.
- 2) Korea Energy Management Corporation, Cogeneration System, 2006.
- 3) Korea Energy Management Corporation, Validation on Energy Conservation Possibility about Small Cogeneration System, 2009.
- 4) M. R. Ryu, Y. H. Kim, K. H. Lee and H. S. Park, "Optimization of an Electric Microwave Oven Window Using Taguchi Design," Spring Conference Proceedings of KSME, pp.177-184, 2005.
- 5) S. Kodiyalam, J. S. Lin and B. A. Wujek, Design of Experiments Based Response Surface Models for Design Optimization, Proceedings of the 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference and Exhibit AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Forum-Part4, pp.2718-2727, 1998.
- 6) P. W. M. John, Statistical Design and Analysis of Experimental Design in Engineering and the Physical Sciences, John Wiley & Sons, New York, Vols.1-2, 1964.
- 7) V. V. Fedorov, Theory of Optimal Experiments, Academic Press, New York, 1972.