

크리깅 모델을 이용한 자동차용 벤트 밸브의 최적설계

박 창 현¹⁾ · 이 영 미²⁾ · 최 동 훈^{*3)}

한양대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 한양대학교 공학대학원 기계 및 산업공학과²⁾ · 한양대학교 최적설계신기술연구센터^{*3)}

Design Optimization of an Automotive Vent Valve Using Kriging Models

Chang-Hyun Park¹⁾ · Young-Mi Lee²⁾ · Dong-Hoon Choi^{*3)}

¹⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Department of Mechanical and Industrial Engineering, Graduate School of Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

³⁾The Center of Innovative Design Optimization Technology, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 8 April 2010 / Accepted 11 June 2011)

Abstract : In this study, the specifications of the components of the vent valve were optimally determined in order to enhance the performance of the vent valve. Design objective was to minimize fuel leakage while satisfying the design constraints on the performance indices. To obtain the optimum solution based on real experiments, several design techniques available in PIAAnO, a commercial PIDO tool, were used. First, an orthogonal array was used to generate training design points and then real experiments were performed to measure the experimental data at the training design points. Next, Kriging metamodels for the objective function and design constraints were generated using the experimental data. Finally, a genetic algorithm was employed to obtain the optimization results using the Kriging models. Fuel leakage of the optimized vent valve was found to be reduced by 95.8% compared to that of the initial one while satisfying all the design constraints.

Key words : Vent valve(벤트 밸브), Orthogonal array(직교배열법), Kriging(크리깅), Genetic algorithm(유전 알고리즘), Design optimization(최적설계)

Nomenclature

- L : amount of oil leak, cc
- A : amount of air leak, cc
- P : pressure, kPa
- V : amount of fuel in the fuel tank, %

1. 서론

차량용 벤트 밸브(vent valve)는 주유량을 결정하고 차량 진복 시 증발가스의 통로를 밀폐시켜 연료 탱크로부터 연료 누출 방지 및 연료탱크 내의 증발

가스를 해소시키는 연료시스템의 주요 부품이다.

과거에는 양산에 앞서 시제품을 제작하여 벤트 밸브의 성능을 평가하였다. 이러한 평가방법은 실제 작동환경 하에서 제품의 성능을 검증하는 최선의 방법이지만, 시험조건에 따라 불확실성이 증가될 수 있고, 반복적인 시제품 제작은 개발 기간 및 비용 증가를 초래한다.

이러한 단점을 보완하기 위해 제품의 성능 및 문제점을 사전에 예측할 수 있는 시뮬레이션기법이 도입되었으며, 근래 제품 개발에 있어서 시뮬레이션기법은 하드웨어 및 소프트웨어 기술의 향상과 더불어 제품 개발에 필수적인 요소가 되었다. 하지

*Corresponding author, E-mail: dhchoi@hanyang.ac.kr

만 실제 작동환경을 고려한 복잡한 실제 시스템의 시뮬레이션 모델 생성과 검증이 어려울 수 있으며, 경우에 따라 과도한 해석시간이 요구된다.

따라서 설계자의 경험 또는 직관을 대신하는 구체적인 수학적 접근방법인 최적설계가 도입되었다. 최적설계를 통해 주어진 구속조건을 만족하면서 동시에 설계자가 원하는 효과인 목적함수를 최대화 또는 최소화 시키는 설계변수값을 자동으로 구할 수 있다. 설계과정에 최적설계기법을 적용할 경우 설계 자동화에 따른 개발 비용의 절감, 설계과정의 개선, 품질 개선 등과 같은 이점을 얻을 수 있다.

하지만 최적설계기법은 일반적으로 최적해를 도출할 때까지 설계변수값을 지속적으로 변화시키면서 시스템의 응답을 매번 요구하기 때문에 1회 해석 시간이 긴 시뮬레이션 모델을 사용하는 최적설계문제의 경우 소요시간이 매우 길어질 수 있다. 또한 정상적인 수렴을 통한 최적해의 제공 시점을 예측하기란 매우 어려운 일이다. 이러한 단점은 짧은 제품 생산주기 내에 새로운 설계안 혹은 설계 개선안을 도출해 내야 하는 산업현장에서 최적설계가 적용되는 것을 어렵게 한다.

이에 반해 실험계획법(Design of Experiments; DOE)은 비록 최적해를 제공하지 못하지만 설계자가 미리 정한 예측 가능한 시간 내에 적절한 설계 개선안을 제공해 줄 수 있다는 장점이 있기 때문에 산업 현장에서 많이 사용되고 있다.

따라서 최적설계를 수행하는데 필요한 시간을 단축시킴으로써 산업현장에서 최적설계를 적용시키려는 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 이 중 실험 계획법을 통해 얻은 시스템의 정보를 바탕으로 근사모델을 생성하여 최적설계를 수행하는 연구가 그 대표적인 예이다.

밸브와 관련된 기존 연구를 살펴보면 다음과 같다. 반도체 생산설비에 사용되는 게이트 밸브에 대한 단조공정에서의 예비형상을 크리깅 모델을 사용하여 최적화하는 연구¹⁾와 균열이 있는 차량용 PCV (Positive Crankcase Ventilation) 밸브를 통과하는 블로우바이 가스(blow-by gas)에 의한 차압(differential pressure)의 영향을 수치해석을 통해 평가하는 연구²⁾가 수행되었다. 또한 게이트 밸브에 대해 다구찌 기

법과 변동 기법을 이용하여 얻은 최적해를 비교하는 연구³⁾와 블로우바이 가스에 의한 대기오염을 방지하기 위해 차량용 크랭크실 환기장치에의 오일 분리효율 등에 대한 연구⁴⁾가 수행되었다.

기존 연구들에서 차량용 벤트 밸브를 설계 대상으로 하거나 주요 성능 지수중의 하나인 연료누출 방지성능 향상을 위한 연구는 수행되지 않았다. 특히, 실제 벤트 밸브의 다양한 성능 검증시험 결과를 바탕으로 근사모델을 이용한 최적설계는 시도되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 자동차용 벤트 밸브의 연료누출방지성능을 정확히 예측하면서 설계의 효율성을 높이기 위해 실험계획법 중의 하나인 직교배열법(orthogonal array)을 사용하여 실험을 계획하고, 이에 따라 다양한 벤트 밸브 성능시험을 수행한 후, 각 실험점과 시험결과들을 기반으로 근사모델인 크리깅(Kriging) 모델을 생성하였다. 크리깅 모델을 이용한 최적설계에서 이산변수를 다루기 위해 전역최적화기법 중의 하나인 유전 알고리즘(Genetic Algorithm; GA)을 이용하고, 최적화된 부품의 누유 시험을 통해 연료누출방지성능을 검증하였다.

2. 벤트 밸브의 기능 및 구조

2.1 연료장치와 연료계통

연료장치란 통상 내연기관을 사용하는 차량에 장착되어 혼합기를 최적의 연소상태로 조절하여 엔진에 공급하는 장치이다. 연료 장치에는 연료를 저장하는 연료탱크(fuel tank)와 저장된 연료를 압송하는 연료펌프(fuel pump), 연료에 포함된 수분과 먼지 등을 걸러내는 연료필터(fuel filter)로 구성되어 있다.

연료라인(fuel line)으로 연결되는 이러한 구성요소들은 연료탱크에 저장된 연료를 최종적으로 기화기(carburettor) 또는 전자제어 연료분사 시스템으로 공급하여 흡기계통의 공기와 혼합된 상태로 엔진의 실린더에 공급한다. 연료탱크부터 기화기까지의 연료흐름을 통상 연료계통이라고 한다. 연료계통의 효율은 출력과 같은 차량의 엔진성능과 경제성을 결정하는 중요한 요소이다.

2.2 연료증발가스

연료탱크에는 주행 중 연료의 요동이나 유동을

억제하기 위한 패널과 연료 유량계, 연료를 공급받기 위한 주유관 등이 설치되어 있다. 시간의 경과에 따라 차량의 기화기나 연료탱크 내부에 저장된 연료로부터 가솔린의 증발가스가 발생하게 되는데 이를 연료증발가스(evaporated gas)라고 한다.

연료증발가스의 조성은 연료의 탄화수소와 동일하고 차량으로부터 배출되는 모든 탄화수소량의 약 15%를 차지하기 때문에 연료증발가스의 대기 중 방출은 심각한 대기오염의 원인이 된다. 따라서 차량에서 발생하는 대기오염원에 대한 환경 기준치를 충족하기 위해 연료증발가스는 차량 자체에서 회수되거나 방출이 방지되어야 한다.

2.3 벤트 밸브의 설치 및 기능

벤트 밸브는 연료장치를 보여주는 Fig. 1에서와 같이 연료탱크 내부 상면에 설치된다.

벤트 밸브의 주요 기능은 다음과 같다. 벤트 밸브는 연료탱크에 충전되는 연료의 유면 높이에 따라 연동되어 주유량을 조절하며, 차량 전복 시 통로를 밀폐하여 연료탱크로부터 연료의 누출을 방지한다. 또한 주유할 때 개방되고, 주유 후 단힘으로써 연료탱크 내부에서 발생된 연료증발가스를 대기 중에 배출되지 않도록 한다.

2.4 벤트 밸브의 구조

벤트 밸브의 몸통부는 Fig. 2에서와 같이 플랜지(flange)와 하우스징 플로트(housing float), 컵 플로트(cup float)로 구성된다. 플랜지는 연료탱크 상면을 관통하고 고정부재에 연결되어 벤트 밸브를 연료탱크에 고정한다. 하우스징 플로트는 플랜지 하단에 결합되어 연료탱크 내부에 삽입되는 부품이며, 컵 플로트는 하우스징 플로트의 외부에 결합되어 벤트 밸브의 외관을 구성한다.



Fig. 1 Vent valve in the fuel system

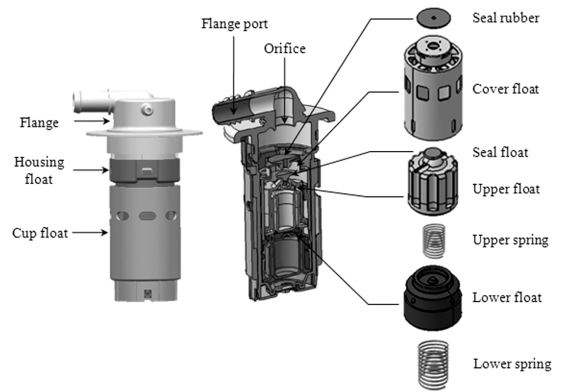


Fig. 2 Assembly of a vent valve

벤트 밸브의 내부는 Fig. 2와 같다. 연료증발가스는 홀 형태의 오리피스(orifice)와 플랜지 포트를 거쳐 캐니스터로 이송된다. 씰 러버(seal rubber)는 플랜지 포트 안에서 상하로 움직이면서 오리피스를 개폐하는 역할을 한다. 씰 플로트(seal float)는 커버 플로트(cover float) 내부에서 상하로 움직이면서 커버 플로트의 홀을 개폐한다. 어퍼 플로트(upper float)와 로워 플로트(lower float)는 각각 어퍼 스프링(upper spring)과 로워 스프링(lower spring)의 탄성에 의해 상하로 움직인다.

3. 벤트 밸브의 성능 검증시험

3.1 누유시험

누유시험(rollover leak test)은 벤트 밸브의 누기 및 누유를 검증하는 시험이며, 시험장비는 Fig. 3과 같다. 벤트 밸브를 지그(jig)에 장착하여 90°와 180°, 270°로 기울인 상태로 각각 1.25 kPa과 10 kPa의 압력을 부하하여 5분간 유지했을 때 공기의 누기량은 90 cc 이하, 연료 누유량은 1 cc 이하가 되어야 한다.

3.2 연료요동시험

연료요동시험(slosh test)은 차량이 운행 중 가다 서다를 반복하였을 경우 벤트 밸브의 연료 넘침량을 측정하는 시험이며, 시험장비는 Fig. 4와 같다. 연료요동시험에서 벤트 밸브가 성능을 만족하기 위해서는 연료탱크가 90%와 100% 채워진 상태에서 공기압을 각각 10 lpm과 5 lpm 인가하여 75 cycle로 시험하였을 때 연료 넘침량은 각각 10 cc 이하여야 한다.

3.3 개폐시험

개폐시험(reopening test)은 벤트 밸브의 연료 흐름의 통기가 유지되는지를 평가하는 시험이며, 시험장비는 Fig. 5와 같다. 개폐시험에서 벤트 밸브가 성능을 만족하기 위해서는 벤트 밸브가 닫힌 상태로 회전되어 있을 경우 이를 정상위치로 되돌렸을 때 벤트 밸브의 압력은 6 kPa 이상이 되어야 하고, 이 경우 유량 흐름을 10 lpm 이상 유지할 수 있다.

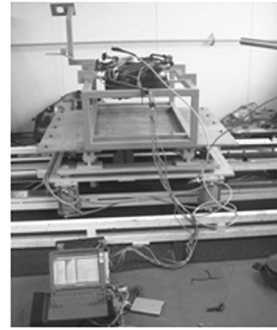


Fig. 4 Slosh test equipment

3.4 압력강하시험

압력강하시험(pressure drop test)의 첫 번째 목적은 시중 주유속도 보다 빠른 주유속도에 의해 발생하는 압력강하로 인한 벤트 밸브의 닫힘 여부를 평가하는 것이다. 두 번째는 주유소 저장고의 차가운 연료가 더운 대기 온도로 인해 온도가 상승한 빈 상태의 연료탱크에 주유될 경우 급속한 압력 상승으로 인한 이른 주유차단(shutoff) 여부를 평가하는 것이다. 시험장비는 Fig. 6과 같고, 압력강하시험에서 벤트 밸브가 성능을 만족하기 위해서는 벤트 밸브포트를 통한 공기압 180 lpm을 인가하였을 때의 압력 강하량은 0.35 kPa 이하여야 한다.

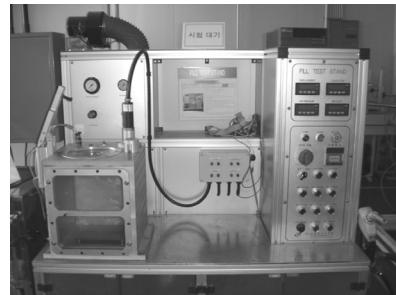


Fig. 5 Reopening test equipment

3.5 주유시험

주유시험(refueling test)은 주유할 때 압력상승으로 인한 과소주유 및 과다주유, 연료넘침 발생을 점검하기 위한 시험이며, 시험장비는 Fig. 7과 같다. 주유시험에서 벤트 밸브가 성능을 만족하기 위해서는 주유속도 4 gpm과 10 gpm, 12 gpm에서 연료탱크의 연료량은 각각 1차 주유차단에서는 95% 이상, 2차 주유차단에서는 106% 이하여야 한다.



Fig. 6 Pressure drop test equipment

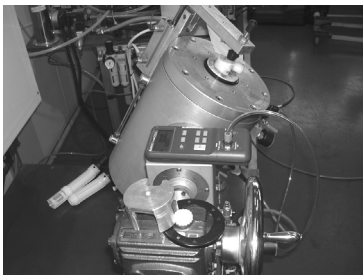


Fig. 3 Rollover leak test equipment



Fig. 7 Refueling test equipment

4. 벤트 밸브의 최적설계

4.1 설계문제 정의

4.1.1 설계 요구사항

벤트 밸브의 성능과 구조적 안정성을 만족하기 위한 설계 요구사항은 다음과 같다.

- 1) 누유시험 중 지그 경사 90°, 1.25 kPa 압력 인가 상태에서 벤트 밸브의 연료 누유량과 공기 누기량은 최소화 되어야 한다.
- 2) 연료요동시험에서 벤트 밸브의 연료 넘침량은 허용값 이하여야 한다.
- 3) 개폐시험에서 벤트 밸브가 유지해야 하는 압력은 허용값 이상이어야 한다.
- 4) 압력강하시험에서 벤트 밸브의 압력 강하량은 허용값 이하여야 한다.
- 5) 주유시험에서 주요속도에 따른 연료탱크의 연료량은 허용값 이내여야 한다.

4.1.2 설계변수

설계변수는 벤트 밸브의 주요부품인 어퍼 스프링과 로워 스프링, 쉘 러버, 플랜지에서 선정하였다.

어퍼 스프링과 로워 스프링의 형상은 Fig. 8과 같다. 스프링의 특성은 스프링 상수(spring constant)에 의해 결정되며, 스프링 상수는 유효권수(number of active coils)와 자유장(free height)에 의해 계산된다. 따라서 설계변수는 각 스프링들의 유효권수와 자유장이며, 수준에 따른 설계변수 값은 Table 1과 같다. 쉘 러버는 Table 2에서와 같이 그 형상에 따라 여섯 가지 종류로 나눌 수 있으며, 각 쉘 러버의 타입과 재질, 오리피스 사이즈, 경도는 Table 3과 같다. 플랜지는 Table 4와 같이 세 종류로 나눌 수 있으며, 설계변수는 플랜지의 오리피스 직경이다.

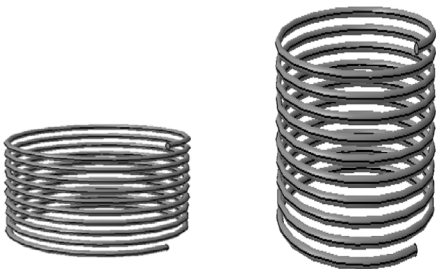


Fig. 8 Upper (left) and lower (right) spring

Table 1 Design variables of upper and lower springs

Design variables		Level					
		1	2	3	4	5	6
Upper spring	Number of active coils : x_1	20	21	22	23	24	25
	Free height : x_2 (mm)	60.3	67	73.7	-	-	-
Lower spring	Number of active coils : x_3	20	21	22	23	24	25
	Free height : x_4 (mm)	88.7	98.5	108.3	-	-	-

Table 2 Seal rubbers

Design variable	Level					
	1	2	3	4	5	6
Seal rubber type : x_5						

Table 3 Specification of seal rubbers

Seal rubber	Level					
	1	2	3	4	5	6
Type	Wing	Flat	Wing	Wing	Flat	Wing
Material	FSR	FSR	FSR	FSR	FSR	FKM
Orifice size (mm)	$\phi 2.5$	$\phi 4.0$	$\phi 2.5$	$\phi 2.5$	$\phi 2.5$	$\phi 2.5$
Hardness	60	60	40	50	60	60

Table 4 Flange orifices

Design variable	Level		
	1	2	3
Flange orifice size : x_6 (mm)	$\phi 11$ 	$\phi 13$ 	$\phi 15$

4.1.3 설계문제 정식화

벤트 밸브의 누유량 최소화를 위한 설계문제를 정식화하면 식 (1)과 같다.

벤트 밸브는 주유량 결정, 차량 전복 시 연료 누출 방지 및 증발가스 해소를 목적으로 하며 이중 연료 누출 방지는 승객 안전과 직결된 중요한 기능이다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find} && x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 \\
 &\text{to minimize} && L^{RLT\#2} \\
 &\text{subject to} && A_{G_1}^{RLT\#1} \leq 90 \\
 &&& L_{G_2}^{RLT\#2} \leq 1 \\
 &&& L_{G_3}^{ST\#1} \leq 10 \\
 &&& L_{G_4}^{ST\#2} \leq 10 \\
 &&& P_{G_5}^{RoT} \geq 6 \\
 &&& P_{G_6}^{PDT} \leq 0.35 \quad (1) \\
 &&& V_{G_7}^{RfT\#1} \geq 95 \\
 &&& V_{G_8}^{RfT\#2} \leq 106 \\
 &&& V_{G_9}^{RfT\#3} \geq 95 \\
 &&& V_{G_{10}}^{RfT\#4} \leq 106 \\
 &&& V_{G_{11}}^{RfT\#5} \geq 95 \\
 &&& V_{G_{12}}^{RfT\#6} \leq 106
 \end{aligned}$$

따라서 본 연구에서는 누유시험(RLT)에서 연료의 누유량(L) 최소화를 목적함수로 선정하였다.

구속조건은 G₁에서부터 G₁₂까지 모두 열두 개이며, 다섯 가지 시험별로 구분하면 다음과 같다.

누유시험(RLT)의 경우 지그 경사 90°, 1.25 kPa 압력 인가 상태에서 5분간 유지 할 경우, 공기의 누기량(A)은 90 cc 이하가 되어야 하며, 연료의 누유량(L)은 1 cc 이하여야 한다.

연료요동시험(ST)의 경우 연료탱크의 연료량이 90%일 때 공기압 10 lpm 인가에서 연료 넘침량(L)은 10 cc 이하가 되어야 하며, 연료탱크의 연료량이 100%일 때 공기압 5 lpm 인가에서 연료 넘침량(L)도 10 cc 이하가 되어야 한다.

개폐시험(RoT)의 경우 닫힌 상태로 회전되어 있는 벤트 밸브를 정상위치로 되돌렸을 때 벤트 밸브의 유지 압력(P)은 6 kPa 이상이어야 한다.

압력강하시험(PDT)의 경우 공기압 180 lpm 인가 시 벤트 밸브의 강하 압력(P)은 0.35 kPa 이하여야 한다.

주유시험(RfT)의 경우 주유 속도 4 gpm과 10 gpm, 12 gpm에서 연료탱크의 연료량(V)은 각각 1차 주유

차단 일 때 95% 이상, 2차 주유차단 일 때 106% 이하가 되어야 한다.

4.2 실험계획법

본 논문에서는 설계변수의 개수와 수준수, 직교성을 고려하여 상용 PIDO(Process Integration and Design Optimization) 툴인 PIANO(Process Integration, Automation, and Optimization)⁵⁾에서 제공하는 직교배열표 중의 하나인 L₃₆(6³3²2¹)을 이용하여 실험계획을 세우고, 벤트 밸브의 성능 검증시험을 수행하였다.

직교배열표는 인자의 수가 많은 경우, 각 인자의 주효과와 일부의 교호작용을 구하고, 나머지 교호작용과 고차의 교호작용에 대한 정보를 얻지 않음으로써 실험횟수를 적게 할 수 있는 실험계획을 손쉽게 만들 수 있도록 만든 표를 말한다.⁶⁾

직교배열표는 이론적 배경이 부족하더라도 일부 실시법과 분할법, 교락법 등의 배치를 쉽게 할 수 있는 장점이 있다. 또한 요인변동의 계산이 용이하여 분산분석표의 작성이 쉽고, 실험의 크기를 확대시키지 않고도 실험에 많은 인자를 넣을 수 있으며, 실험 데이터의 해석이 용이하다.

직교배열표에 따라 서른여섯 가지의 벤트 밸브를 구성하였고 각각의 벤트 밸브에 대해 다섯 가지의 성능검증 시험을 수행하였다. 시험 결과, 열여섯 가지의 벤트 밸브만이 모든 성능검증 시험의 기준을 만족하였다. 특히 누유시험에서의 공기 누기량과 연료 누유량에 대한 기준 위배인 경우가 가장 많음을 확인하였다. 이를 통해 누유시험의 결과가 설계변수에 민감한 성능지수임을 알 수 있다.

4.3 근사모델

근사모델은 관심영역의 일부 또는 전체 영역 내에서 실제 해석모델의 반응값과 변수값과의 관계를 근사화 한다. 본 논문에서는 근사모델로 크리깅 모델을 선정하였다.

대표적인 보간모델인 크리깅은 1951년 채광학자인 Krige의 연구⁷⁾를 바탕으로 1963년 Matheron에 의해 수학적으로 정립 발전되었다.⁸⁾ 그 후 1989년 Sacks에 의해 공학분야에 적용되었으며,⁹⁾ 1998년

Simpson은 여러 메타모델들과의 비교연구를 통해 크리깅이 설계변수가 많고 비선형성이 강한 시스템에서 우수한 예측성능을 보임을 확인하였다.¹⁰⁾ 또한 크리깅은 통계적 추정치를 제공해 주고, 최우량추정법(Maximum Likelyhood Estimation; MLE)을 통해 파라미터를 최적화하기 때문에 사용자의 경험이나 직관에 의존하는 사용자 지정 파라미터는 존재하지 않는다. 따라서 최근 공학분야에서 크리깅의 사용이 증가되고 있는 추세이다.

크리깅 모델은 4.2절에서 기술한 서른여섯개의 실험점과 각 실험점에서의 성능 검증시험 결과를 PIANO상에서 문서 형태로 불러들인 후 PIANO에서 제공하는 근사화기법을 이용하여 생성할 수 있다. 이러한 방법을 통해 누유시험의 공기 누기량과 연료 누유량($A^{RLT\#1}$, $L^{RLT\#2}$), 연료요동시험의 연료 넘침량($L^{ST\#1}$, $L^{ST\#2}$), 개폐시험의 유지 압력(P^{ROT}), 압력강하시험의 강하 압력(P^{DDT}) 및 주유시험의 연료량($V^{RJT\#1}$, $V^{RJT\#2}$, $V^{RJT\#3}$, $V^{RJT\#4}$, $V^{RJT\#5}$, $V^{RJT\#6}$)에 해당하는 열두 개의 성능지수를 크리깅 모델로 각각 생성하였다.

4.4 최적화기법

본 논문에서는 최적화기법으로 유전 알고리즘을 선정하였다.

유전 알고리즘은 전역 최적화기법 중의 하나로, 1975년 John H. Holland에 의해 제안되었다.¹¹⁾ 이 알고리즘은 생물의 진화과정을 묘사한 유전연산자들을 가지고 있어 선택 및 재생산, 교배, 돌연변이 등의 과정을 거쳐 전역해를 탐색하게 된다. 또한 이산변수를 효과적으로 다룰 수 있으며, 함수의 민감도를 요구하지 않기 때문에 함수 형태와 상관없이 적용할 수 있다. 하지만 함수 계산을 비교적 많이 하기 때문에 해석모델에 따라 최적설계를 수행하는데 많은 시간이 소요된다는 단점을 가지고 있다.^{12,13)}

본 논문에서는 여섯 가지의 설계변수 수준을 4.1.2절에 따라 이산화하였다. 또한 목적함수와 구속조건 계산에 사용되는 시험 관련 성능지수들은 4.3절에서 생성한 열두 개의 크리깅 모델이기 때문에 반복과정이 필요한 최적설계를 수행하는데 많은 시간이 요구되지 않는다. 따라서 최적화기법으로

유전 알고리즘을 선정하였으며, 유전 알고리즘은 PIANO에서 제공하는 것을 사용하였다.

4.5 최적설계 결과

최적설계는 PIANO상에서 생성된 크리깅 모델과 유전 알고리즘을 이용하여 수행하였다. 최적설계 결과, 주어진 구속조건($G_1 \sim G_{12}$)을 모두 만족하면서 정상 수렴하였다.

하지만 최적의 설계변수값은 성능지수들의 근사 모델인 크리깅 모델을 사용하여 결정된 값이므로 최적의 설계변수값에 따라 구성된 새로운 벤트 밸브의 성능 검증시험이 수행되어야 한다. 최적의 설계변수값을 적용한 다섯 가지 성능 검증시험 결과를 초기모델 시험 결과와 비교하여 Fig. 9~14에 나타내었다.

목적함수인 누유시험의 연료 누유량은 Fig. 9에서와 같이 초기값에 비해 95.8% 감소한 0.1 cc이었다. 또한 누유시험(Fig. 9)과 연료요동시험(Fig. 10), 개폐시험(Fig. 11), 압력강하시험(Fig. 11), 주유시험(Fig. 12~14)에 관련된 12개의 구속조건($G_1 \sim G_{12}$)은 제한값을 모두 만족하였다. 여기서 Fig. 9~14 그래프의 사선영역은 위배영역을 의미한다.

설계변수의 초기값과 최적값을 Table 5에 비교하였다.

Table 5 Comparison of baseline and optimal design variables

Design variables		Baseline	Optimal
Upper spring	Number of active coils : x_1	25	24
	Free height : x_2 (mm)	67.0	60.3
Lower spring	Number of active coils : x_3	25	23
	Free height : x_4 (mm)	98.5	88.7
Seal rubber type : x_5		Type = Flat Material = FSR Orifice size = $\phi 2.5$ Hardness = 60	Type = Flat Material = FSR Orifice size = $\phi 4.0$ Hardness = 60
Flange orifice size : x_6 (mm)		$\phi 13$	$\phi 15$

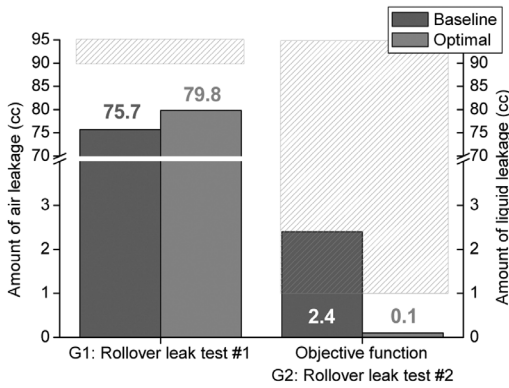


Fig. 9 Comparisons of baseline and optimal results of the rollover leak test

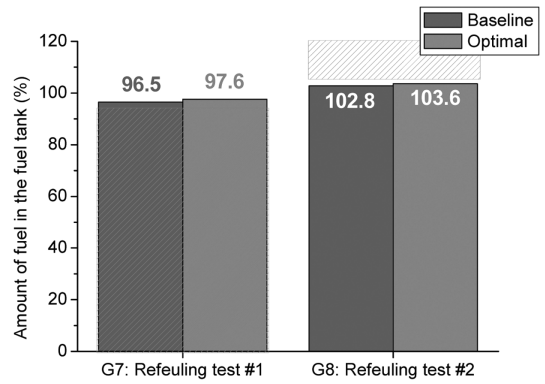


Fig. 12 Comparisons of baseline and optimal results of the refueling test #1 and #2

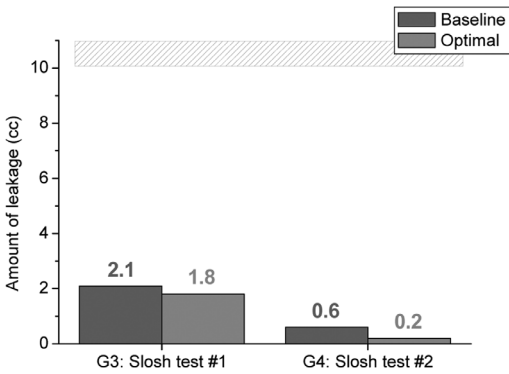


Fig. 10 Comparisons of baseline and optimal results of the slush test

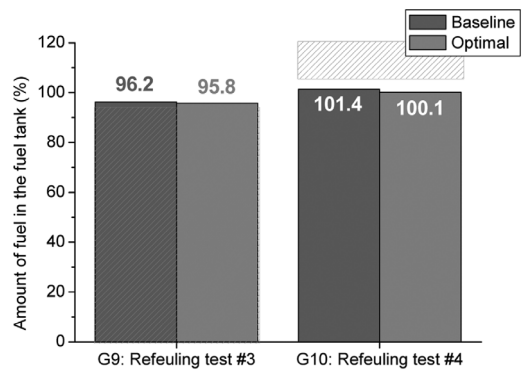


Fig. 13 Comparisons of baseline and optimal results of the refueling test #3 and #4

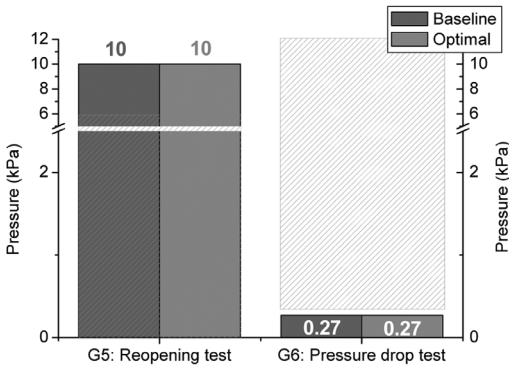


Fig. 11 Comparisons of baseline and optimal results of the reopening test and pressure drop test

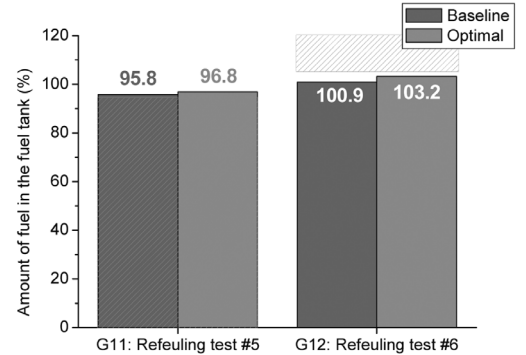


Fig. 14 Comparisons of baseline and optimal results of the refueling test #5 and #6

5. 결론

본 논문에서는 벤트 밸브의 누유량을 최소화하기 위한 최적설계를 수행하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

- 1) 설계요구사항을 바탕으로 벤트 밸브의 누유량을 최소화하는 설계문제를 정식화 하였다.
- 2) 벤트 밸브의 성능을 정확히 예측하면서 설계의 효율성을 높이기 위해 직교배열표를 이용하여

실험계획을 세우고, 실험계획에 따라 벤트 밸브의 성능시험을 수행하였으며, 시험 결과를 바탕으로 근사모델인 크리깅 모델을 생성하였다.

- 3) 유전 알고리즘을 이용한 최적설계 결과, 모든 구속조건을 만족하면서 초기 모델에 비해 연료 누유량을 95.8% 감소시킬 수 있는 최적의 벤트 밸브 설계변수값을 구하였다. 또한 실제 누유시험을 통해 누유량 감소를 확인하여 본 논문에서 적용한 설계 방법의 타당성을 보였다.

본 연구에서 적용한 설계 방법은 벤트 밸브와 유사한 다양한 밸브의 설계 및 개발에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2011년도 2단계 두뇌한국21사업 및 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2011-0016701)에 의해 지원되었으며, 이 연구를 위하여 상용 PIDO 툴인 PIA_nO 소프트웨어를 제공한 (주)피도텍에 감사드립니다.

References

- 1) S. H. Oh, H. G. Kong, J. H. Kang and Y. C. Park, "Optimization Forging Process of Gate Valve using DACE," J. SKMPE, Vol.6, No.1, pp.71-77, 2007.
- 2) S. M. Song, O. H. Kwon and Y. W. Lee, "Effect of the Differential Pressure by the Blow-by Gas Flow on the PCV Valve with a Crack," Int. J. Automotive Technology, Vol.8, No.2, pp.219-224, 2007.
- 3) S. H. Kim, Y. J. Jo, S. G. Kim, J. H. Kang and Y. C. Park, "Design Sensitivity Analysis of Gate Valve using the Variational Technology," J. SKMPE, Vol.7, No.1, pp.38-46, 2008.
- 4) J. H. Seo, B. C. Na, J. Y. Kim, S. U. Park and D. S. Lim, "A Study on Oil Separation Performance of Crack-case Ventilation System," Transactions of KSAE, Vol.16, No.3, pp.144-150, 2008.
- 5) FRAMAX Inc., Process Integration, Automation, and Optimization - PIA_nO User's Manual, 2010.
- 6) A. S. Hedayat, N. J. A. Sloane and J. Stufken, Orthogonal Arrays: Theory and Applications, Springer Verlag, New York, 1999.
- 7) D. G. Krige, "A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand," J. Chem., Metal. and Mining Soc. South Africa, Vol.52, No.6, pp.119-139, 1951.
- 8) G. Matheron, "Principles of Geostatistics, Economic Geology," Economic Geology, Vol.58, No.8, pp.1246-1266, 1963.
- 9) J. Sacks, W. J. Welch, T. J. Mitchell and H. P. Wynn, "Design and Analysis of Computer Experiments," Statistical Science, Vol.4, No.4, pp.409-435, 1989.
- 10) T. W. Simpson, J. J. Korte, T. M. Mauery and F. Mistree, "Comparisons of Response Surface and Kriging Models for Multidisciplinary Design Optimization," Proc. 7th AIAA/USAF/NASA/ ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis & Optimization, Vol.1, pp.381-391, 1998.
- 11) J. H. Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems, The University of Michigan Press, Michigan, 1975.
- 12) D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, Massachusetts, 1989.
- 13) R. L. Haupt and S. E. Haupt, Practical Genetic Algorithms, Wiley, New Jersey, 1998.