

다구치 방법과 근사최적설계를 이용한 자동차 연료탱크의 연료 넘침 방지 시스템 설계

박규병* · 이용빈** · 조인근*** · 최동훈*†

* 한양대학교 기계공학과, ** (주)피도텍, *** 한양대학교 공학대학원

Design of Automotive Fuel Tank for Preventing Liquid Carry Over Using Taguchi Method and Approximate Optimization

Gyu-Byung Park*, Yongbin Lee**, In-Geun Cho*** and Dong-Hoon Choi*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

** PIDOTECH Inc.,

*** Graduate school of Engineering, Hanyang Univ.

(Received March 4, 2013 ; Revised May 16, 2013 ; Accepted June 10, 2013)

Key Words: Automotive Fuel Tank(자동차 연료탱크), Taguchi Method(다구치 방법), Approximate Optimization(근사 최적설계), Design of Experiments(실험계획법), Kriging(크리깅)

초록: 자동차 연료탱크는 크게 본체와 본체에 조립되는 부품들로 구성되어 있다. 본체에는 차량 주행 시에 연료탱크에서 발생하는 증발가스를 배출하고, 연료가 외부로 유출되는 것을 방지하기 위한 여러 밸브들이 조립되어 있다. 하지만 이러한 밸브들은 연료 넘침에 주된 원인으로 알려져 있음에도 불구하고 현재 증발가스의 배출과 기구적인 위치만 고려하여 설계되고 있다. 따라서 본 연구에서는 밸브들의 기존기능을 유지하면서 연료 넘침을 최소화 시키기 위해 근사최적설계를 적용하였고, 다구치 방법을 통해 실제 실험에서 근사최적설계의 유용성을 보였다. 결과적으로 최적화된 밸브 위치를 통해 개발기간과 비용을 절감하였고, 연료 넘침 최소화를 통해 자동차의 신뢰성을 향상시켰다.

Abstract: Automotive fuel tank is generally divided into two parts: main frame and assembly parts. While the car is running, valves are used to prevent liquid carry over and to discharge evaporated gas from the fuel tank. However, current fuel tank designs focus on the gas ventilation or secured location. In this study, the location of the parts used to prevent liquid carry over within the fuel tank is evaluated during an optimal design process. To develop this design process, an approximate optimization is applied. Through the optimal design process, the optimal valve location in fuel tank is determined and the approximate optimization is validated by the Taguchi method. Finally, the optimized valve location is used to reduce the development cost and time and to contribute toward improved automobile quality owing to enhanced reliability.

1. 서론

자동차 연료탱크는 자동차가 주행하기 위한 기본적 에너지인 연료를 저장하는 저장고로 운행 시에 발생하는 충격이나 연료의 요동 그리고 외부의 위험요소로부터 연료를 보호하고, 연료탱크 내에서 발생한 증발가스를 배출시킴으로써 차량폭발을

방지시키는 자동차의 중요한 부품이다. 하지만 현존하는 연료탱크의 다수에서 주행 시에 연료 넘침이 발생하고 있어 이로 인한 환경오염과 연비저하를 유발시키고 있다. 따라서 자동차 업체 및 관련 부품 업체들은 양산 제품에 대한 이러한 문제의 개선을 시도하고 있지만 설계과정에서의 객관적인 근거가 없기 때문에 설계자의 주관에 따라 이루어지고 있는 실정이다. 따라서 설계자의 주관적인 설계 결과를 검증하기 위해 또 다른 실험이 필요하게 되고, 이로 인한 많은 비용과 시간이 소비되고 있다.

자동차 연료탱크의 내부에서 발생한 가스를 외부로 배출시키기 위해 연료탱크에 필 리미트 밴트

† Corresponding Author, dhchoi@hanyang.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

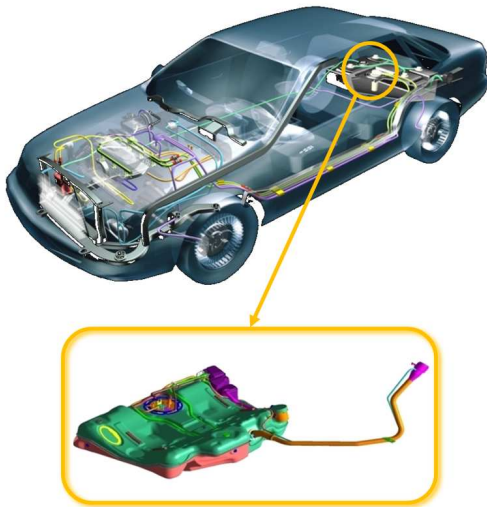


Fig. 1 Automotive fuel tank

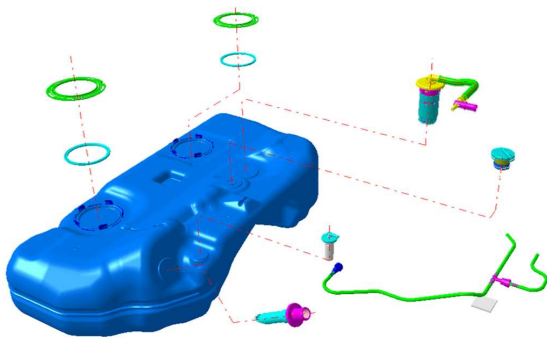


Fig. 2 Assembly component of automotive fuel tank

밸브(Fill Limit Vent Valve, FLVV)와 롤오버 밸브(Rollover Valve, ROV) 그리고 베이퍼 튜브(Vapor Tube)등이 본체에 조립되는데, 이러한 밸브들이 실제 연료 넘침의 주 원인되고 있다. 따라서 자동차 연료탱크 설계에서 필 리미트 밴트 밸브와 롤 오버 밸브의 기구적 형상을 고려하고, 조립되는 위치를 적절하게 선정해야 이러한 밸브들로 인한 연료 넘침을 방지할 수 있다. 하지만 현재까지의 자동차 연료탱크 설계에서는 연료 넘침보다 자동차의 안전을 위해 내부 증발가스 배출에만 초점을 맞춰져 있었기 때문에 지금까지의 자동차용 연료 탱크는 차량 폭발 방지에 우선되어 연료 넘침에는 취약한 자동차 연료탱크를 설계하고 양산해 왔다.

본 연구에서는 자동차의 안전을 위해 연료탱크 내에서 발생하는 증발가스의 배출기능을 그대로 유지시키면서 연료 넘침을 최소화하기 위해 자동차 연료탱크 설계에 최적설계 기법을 도입하여, 자동차의 품질을 높이며 환경오염 및 연비저하를 방지하고 주관적 설계로 인한 설계오류에서 발생하는 비용과 시간을 절감하고자 한다. 이를 위해

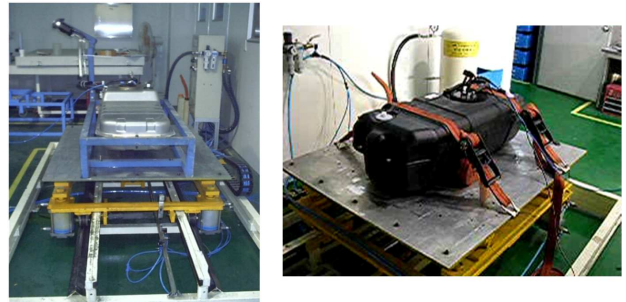


Fig. 3 Fuel sloshing test

전산실험이 아닌 실제실험을 실험계획법⁽¹⁾으로 계획하여 수행하였으며, 이러한 실제 실험 결과를 이용하여 근사최적설계를 수행하였다⁽²⁾. 또한 다구 치 방법(Taguchi method)을 통해 전산실험이 아닌 실제 실험에서 근사최적설계의 유용성을 보이고⁽³⁾, 확인 실험을 통해 도출된 최적해를 검증하고자 한다.

2. 자동차 연료탱크

2.1 자동차 연료탱크의 구조 및 기능

자동차 연료탱크는 Fig. 1 에서와 같이 자동차의 하부에 조립되는 부품으로 구성요소로는 Fig. 2 와 같이 연료탱크 본체와 본체에 조립되는 필 리미트 밴트 밸브, 롤오버 밸브, 베이퍼 튜브 등으로 구성 되어 있다.

자동차 연료탱크 본체는 연료탱크의 대부분을 차지하는 구성요소로서 연료를 저장하는 부품이다. 필 리미트 밴트 밸브는 연료탱크의 주유량을 결정 하는 기능을 하며, 롤오버 밸브는 차량 전복 시에 밸브가 닫히면서 연료가 연료탱크의 외부로 유출 되는 것을 방지시킨다. 그리고 차량이 전복되었을 시에는 위의 두 밸브는 밸브가 닫히면서 연료탱크 내의 연료가 외부로 배출되지 않도록 막아주고, 연료탱크 내부의 증발가스를 배출시켜준다. 그리고 베이퍼 튜브는 이러한 밸브들로부터 배출되는 증발가스의 배출 통로 역할을 한다.

2.2 연료 넘침량 측정을 위한 연료 요동 실험

연료 요동 실험은 자동차 연료탱크 내의 연료를 자동차의 주행조건과 유사하게 강제로 요동시키면서 연료탱크에서 연료의 넘침량을 측정하는 실험 이며, Fig. 3 과 같이 구성된다.

이 실험 장치는 실제 자동차의 출발, 주행 및 제동 조건을 실제거동과 유사하게 시뮬레이션 (Simulation) 할 수 있으며, 연료가 요동할 때에 필 리미트 밴트 밸브와 롤오버 밸브를 통해 발생하는

Table 1 Design variable

Design Variable		Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	Level 6
x ₁	ROV Position	Front Middle	Front Left	Front Right	Rear Middle	Rear Left	Rear Right
x ₂	FLVV Position	Front Middle	Front Left	Front Right	Rear Middle	Rear Left	Rear Right
x ₃	Fuel Tank Type	Cigar Type	Saddle Type	Single Type	-	-	-
x ₄	FLVV Orifice Size	11mm	13mm	15mm	-	-	-
x ₅	ROV Seal Type	Plastic	Plastic + Rubber	-	-	-	-
x ₆	Fuel Level	80%	85%	90%	100%	-	-

연료 넘침량을 측정할 수 있다. 연료 요동 실험은 실제로 각 실험조건에 맞도록 실험용 연료탱크를 제작하여 일반적인 자동차 주행방향과 동일하게 실험 장치에 설치하여 실험을 진행하였다.

3. 최적설계

3.1 설계 요구사항 및 설계변수

자동차 연료탱크를 보다 친환경적이고 안전하게 설계하려면 안전을 위해 연료탱크에 설치되는 밸브들의 증발가스 배출기능을 유지시키면서 자동차 주행 시에 발생하는 요동에 의한 연료 넘침을 최소화 해야 한다. 따라서 증발가스 배출을 위한 밸브들의 기구적인 제약뿐만 아니라 기능적인 제약을 만족시키도록 밸브들의 설치위치에 대한 정보와 그 밖에 연료 넘침에 영향을 미칠 것으로 예상되는 인자들을 설계변수로 선정하였다.

우선 연료 넘침에 가장 큰 영향을 미치는 롤오버 밸브와 필 리미트 밴트 밸브의 설치위치를 설계변수로 선정하였다. 그리고 자동차 연료탱크의 형상에 따라 연료 넘침이 다르게 발생하기 때문에 연료탱크의 형상도 설계변수로 선정하였으며, 필 리미트 밴트 밸브에서 증발가스 배출을 위해 존재하는 오리피스(Orifice)는 구조적으로 연료 넘침에 직접적인 영향을 미칠 것으로 예상되므로 필 리미트 밴트 밸브의 오리피스 직경을 설계변수로 선정하였다. 그리고 롤오버 밸브의 내부에 존재하는 씰(Seal)은 타입에 따라 차량 전복 시에 연료 넘침 방지 성능이 다르므로 설계변수로 선정하였다. 또한, 연료탱크의 연료량도 연료 넘침에 영향을 미치는 인자로 예상되어 설계변수에 포함하였다.

이렇게 선정된 설계변수들과 이들에 대한 각 수

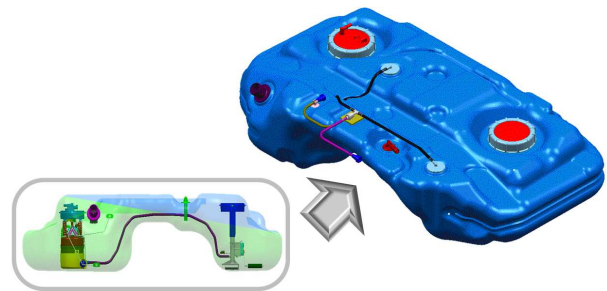


Fig. 4 Saddle type fuel tank

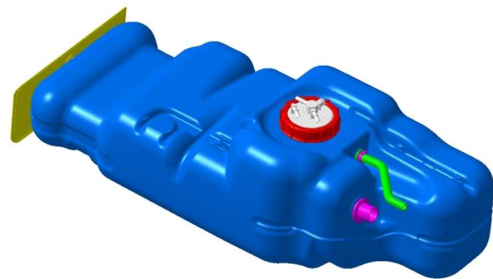


Fig. 5 Cigar type fuel tank

준의 실제 값은 Table 1 에 정리하였다.

롤오버 밸브와 필 리미트 밴트 밸브는 기구적인 제약과 기능적인 제약에 의해 연료탱크의 앞쪽 중앙(Front Middle, FM), 앞쪽 좌측(Front Left, FL), 앞쪽 우측 (Front Right, FR), 뒤쪽 중앙(Rear Middle, RM), 뒤쪽 좌측(Rear Left, RL) 그리고 뒤쪽 우측 (Rear Right, RR)에 설치 될 수 있다.

연료탱크의 형상은 새들(saddle) 타입, 시거 (cigar) 타입 그리고 싱글(single) 타입으로 나눌 수 있다. 새들 타입은 Fig. 4 와 같이 외형이 말 안장 모양과 비슷하고 배기관(exhaust pipe)이 연료탱크의 중앙으로 지나가 좌우로 챔버(chamber)가 분리 되어 있는 형상이며, 시거 타입은 Fig. 5 와 같이



Fig. 6 Single type fuel tank

자동차의 길이 방향으로 조립되는 연료탱크로 길이방향으로 기다란 형상이다. 마지막으로 싱글 타입은 가장 일반적으로 사용되는 연료탱크이며 Fig. 6와 같은 형상을 가진다.

Fig. 7에서와 같이 필 리미트 밸브 내부의 오리피스의 직경은 실제 필 리미트 밸브의 기구적 제한에 따라 11mm, 13mm, 15mm로 설정하였으며, 롤오버 밸브의 씬은 Fig. 8에서 보여지며, 타입은 플라스틱(Plastic)과 플라스틱과 고무를 조합한 타입이 있다.

그리고 연료량은 비교적 연료가 많이 있을 때에 연료 넘침이 발생하기 때문에 80%부터 100%까지 적절하게 설정하였다.

이와 같이 본 논문에서의 설계변수들은 실제 실험을 진행하기 위해서 모든 설계변수를 다수준의 이산형 설계변수로 설정하였다.

3.2 설계문제 정식화

앞 절에서 정의한 설계 요구사항과 선정된 설계 변수들을 바탕으로 설계문제를 정식화 하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find} \quad x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 \\
 & \text{Minimize} \quad \text{Liquid Carry Over}
 \end{aligned} \tag{1}$$

식(1)에서와 같이 연료탱크 내의 증발가스를 원활하게 배출시키면서 연료 넘침량을 최소화하기 위한 설계문제를 정식화하였다. 설계변수는 앞 절에서 선정된 연료 넘침에 영향을 미칠 것으로 예상되는 인자들이며, 목적함수는 연료 넘침량을 최소화 하는 것이다.

3.3 근사최적설계

3.3.1 실험계획법 및 근사모델 생성

앞 절에서 선정된 다수준의 이산형 설계변수를

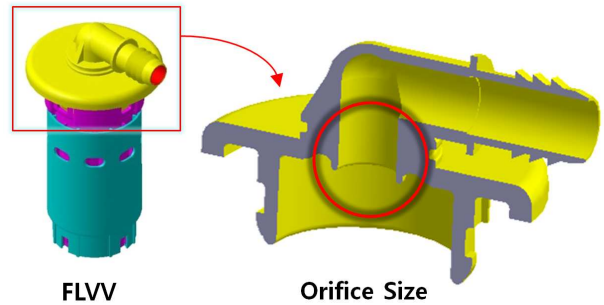


Fig. 7 FLVV orifice

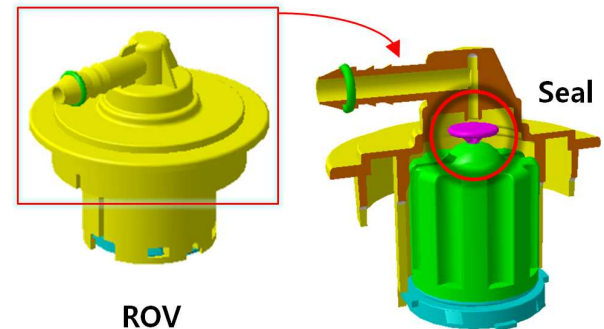


Fig. 8 ROV seal

효율적으로 처리하기 위해서 직교배열표⁽⁴⁾를 사용하였다. 본 논문에서 사용되는 직교배열표는 각 설계변수의 수준을 포함하면서 적절한 실험수를 가진 $L_{36}2^93^46^2$ 이며, 이 직교배열표는 총 실험수 36번에 2수준 9개, 3수준 4개, 6수준 2개로 총 15개의 인자를 가지고 있다. 설계변수 중에서 4수준을 갖는 인자인 연료량(Fuel Level, x_6)은 위의 직교배열표에서 2수준의 열 2개를 조합법을 사용하여 4수준으로 만들어 배치시켰고, 나머지 설계변수는 수준에 따라 해당 직교배열표의 열에 설계변수들을 배치시켰다. 따라서 본 연구에서 사용되는 직교배열표는 조합법을 사용해 수정된 $L_{36}2^13^24^16^2$ 가 된다. 선정된 직교배열표에서 예측하지 못하는 실제 실험의 잡음 효과를 최소화 하기 위해서 각 실험점에서 3번의 반복실험을 실시하였고, 그 결과는 Table 2와 같다.

근사모델을 생성하기 위해 Table 2의 직교배열표를 통해 얻은 반복실험 결과들의 평균값을 사용하였으며, 근사모델은 비선형성을 잘 표현할 수 있는 보간모델(Interpolation model)인 크리깅 근사모델⁽⁵⁾을 사용하였다. 크리깅 근사모델에서 전역모델은 상수를 사용하였고, 전역모델로부터 편차를 표현하는 상관함수는 가우시안(Gaussian) 함수를 사용하였다.

위와 같은 방법으로 생성된 크리깅 근사모델을 바탕으로 각 설계변수에서 응답값(연료 넘침량)의

Table 2 Orthogonal array (OA, $L_{36}2^13^24^16^2$)

Exp. No.	Design Variable						Objective Function		
	ROV Position	FLVV Position	Fuel Tank Type	FLVV Orifice Size	ROV Seal Type	Fuel Level	Liquid Carry Over (cc)		
							Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3
1	1	1	1	2	1	4	4.0	5.5	3.5
2	2	2	1	2	2	4	5.0	6.0	5.0
3	1	2	2	3	1	1	5.0	6.0	5.5
4	2	1	2	3	2	1	3.0	3.0	4.0
5	3	5	1	3	1	2	1.0	1.5	1.2
6	4	6	1	3	1	3	5.0	7.0	6.0
⋮									
31	1	4	1	1	2	4	0.5	0.5	1.0
32	2	3	1	1	2	2	7.0	6.0	7.0
33	3	1	3	2	2	3	3.0	3.0	3.5
34	4	2	3	2	1	2	2.5	3.0	3.0
35	3	2	1	1	2	1	6.0	2.5	7.0
36	4	1	1	1	1	3	1.0	6.0	1.0

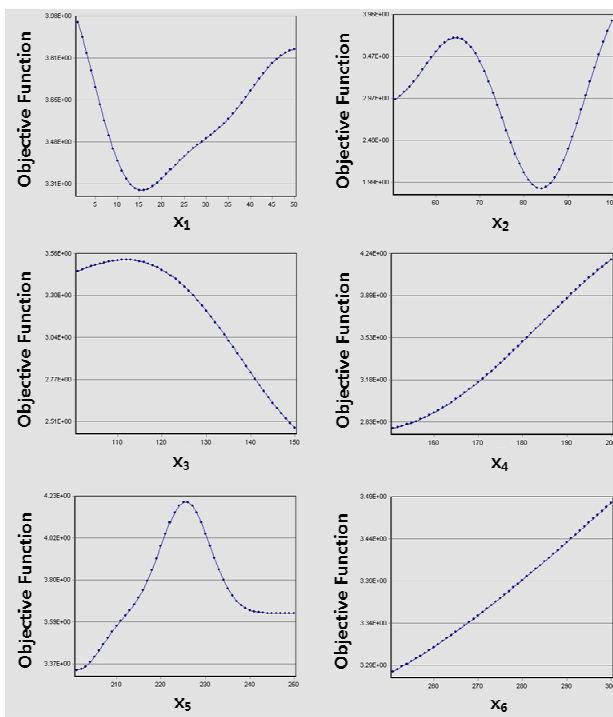


Fig. 9 Parametric study using kriging model

경향을 파악하기 위해 파라메트릭 스터디 (Parametric study)를 수행하였다. 그 결과, Fig. 9에서 보는 바와 같이 본 설계문제의 목적함수인 연료 넘침은 롤오버 밸브와 필 리미트 밴트 밸브의 위치, 롤오버 밸브 스피 타입에서 매우 비선형적인 경향을 보이므로 이러한 비선형성을 잘 표현할 수 있는 크리깅 근사모델의 사용은 적절하다고 볼 수 있다.

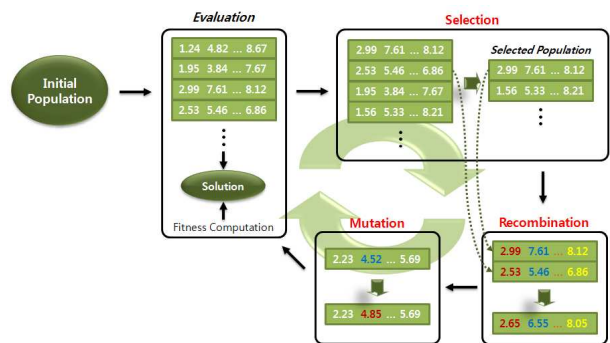


Fig. 10 Procedure of the evolutionary algorithm

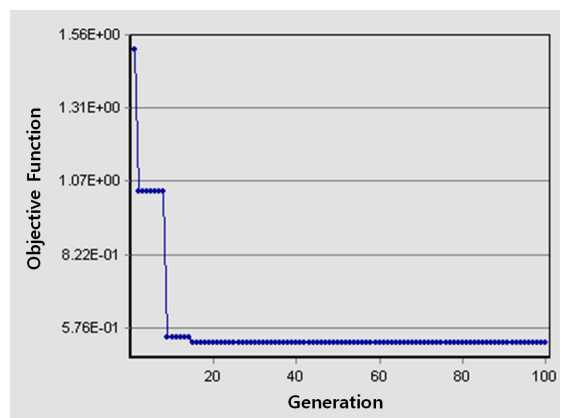


Fig. 11 Convergence history

3.3.2 최적화 알고리즘

이 절에서는 3.3.1 절에서 생성된 크리깅 근사모델(목적함수)을 바탕으로 최적설계를 수행하였다. 본 연구에서는 다수준의 이산형 설계변수를 효율적으로 다룰 수 있고, 전역 최적해를 찾을 수

있는 최적화 기법인 진화 알고리즘⁽⁶⁾을 사용하였다. 진화 알고리즘은 적자생존의 법칙에 따른 진화과정을 모사한 방법으로 선택(Selection), 재분배(Recombination), 돌연변이(Mutation)를 통해 최적해를 도출하는 방법이다. 이 방법의 수행과정은 Fig. 10 과 같고, 수렴조건을 만족할 때까지 반복연산을 수행하였다.

3.3.3 최적설계 결과

목적함수를 크리깅 근사모델을 사용하고, 진화 알고리즘이라는 전역 최적화 기법을 사용하여 최적해를 도출한 결과는 Fig. 11 에서 보는 바와 같이 15 번의 반복계산에서 최적해에 도달하였고, 이후 100 번의 반복계산까지 동일한 값을 유지하였다. 따라서 이 결과는 충분히 수렴한 결과라고 볼 수 있으며, 이러한 근사최적설계의 결과는 Table 3 과 같다.

최적설계 결과를 살펴보면 롤오버 밸브와 필 리

Table 3 Optimum of approximate optimization

Design Variable		Optimum Level	Optimum Result
x ₁	ROV Position	4	Rear Middle
x ₂	FLVV Position	4	Rear Middle
x ₃	Fuel Tank Type	2	Saddle Type
x ₄	FLVV Orifice Size	2	13mm
x ₅	ROV Seal Type	2	Plastic + Rubber
x ₆	Fuel Level	2	85%

Table 4 Signal to noise ratio (S/N ratio)

Exp. No.	Control Factor						S/N Ratio
	ROV Position (A)	FLVV Position (B)	Fuel Tank Type (C)	FLVV Orifice Size (D)	ROV Seal Type (E)	Fuel Level (F)	
1	1	1	1	2	1	4	-4.5230
2	2	2	1	2	2	4	-16.1979
3	1	2	2	3	1	1	-14.8311
4	2	1	2	3	2	1	-16.9607
5	3	5	1	3	1	2	-7.5333
6	4	6	1	3	1	3	-13.6798
∴	∴						∴
31	1	4	1	1	2	4	3.0103
32	2	3	1	1	2	2	-15.6427
33	3	1	3	2	2	3	-14.5738
34	4	2	3	2	1	2	-7.5333
35	3	2	1	1	2	1	1.7609
36	4	1	1	1	1	3	-13.3075

미트 밸브는 뒤쪽 중앙에 위치하는 것이 가장 좋았으며, 새들 타입의 탱크와 13mm 의 필 리 미트 밸브 오리피스, 플라스틱과 고무가 조합된 형태의 롤오버 밸브 씰 타입, 그리고 연료가 85% 있을 때 가장 연료 넘침이 적은 것으로 나타났다.

3.4 다구치 방법을 통한 결과 검증

3.3 절에서 근사최적설계를 통해 다수준의 이산형 설계변수의 최적조합을 찾았지만 이 결과는 아래와 같은 두 가지의 문제점을 가지고 있다. 첫 번째는 실제시험을 반복하여 그 평균값으로 근사 모델을 생성하여 랜덤 에러(random error)를 합리적으로 고려하지 못한 것이며, 두 번째는 다수준의 이산형 설계변수를 단순히 각각의 수준수로 정규화하여 근사모델을 생성한 것이다.

따라서 실제 시험의 랜덤 에러에서 발생하는 노이즈(noise)를 설계에 직접 반영 할 수 있고, 다수준의 이산형 설계변수를 효율적으로 다룰 수 있는 다구치 방법을 통해 3.3 절의 근사최적설계 결과를 검증하고, 확인실험을 통해 다구치 방법^(7,8)을 이용하여 도출된 최적조합을 검증하였다.

3.4.1 S/N 비와 분산분석표

본 논문에서는 목적함수를 최소화하는 설계문제를 다루기 때문에 특성치를 망소특성으로 설정하

$$SN_i = -10 \log \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right\} \quad (2)$$

Table 5 ANOVA table

Control Factor	SS	DF	MS	MS (%)
A ROV Position	218.73	5	43.75	20.27
B FLVV Position	398.44	5	79.69	36.92
C Fuel Tank Type	50.60	2	25.30	11.72
D FLVV Orifice Size	2.25	2	1.13	0.52
E ROV Seal Type	61.75	1	61.75	28.61
F Fuel Level	12.68	3	4.23	1.96
Total	744.44	18	215.83	100.0

Table 6 ANOVA table after pooling

Control Factor	SS	DF	MS	F ₀	F (0.95)
A ROV Position	218.73	5	43.75	14.65	5.05
B FLVV Position	398.44	5	79.69	26.28	5.05
C Fuel Tank Type	50.60	2	25.30	8.47	5.79
E ROV Seal Type	61.75	1	61.75	20.67	6.61
error	14.93	5	2.99		
Total	744.44	18	215.83		

Table 7 Optimum of taguchi method

Control Factor	Optimum Level	Optimum Result
A ROV Position	4	Rear Middle
B FLVV Position	4	Rear Middle
C Fuel Tank Type	2	Saddle Type
D FLVV Orifice Size	2	13mm
E ROV Seal Type	2	Plastic + Rubber
F Fuel Level	3	90%

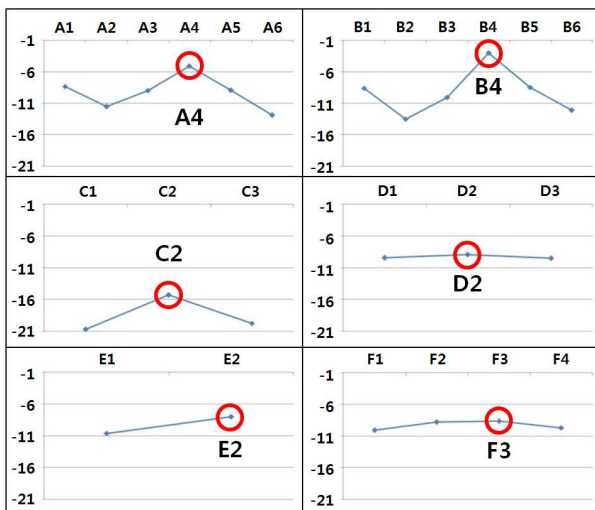


Fig. 12 Main effect of S/N ratio

였고, 식 (2)를 이용하여 Table 2 의 직교배열표의 반복 실험결과를 바탕으로 Table 4 와 같이 S/N 비를 계산하였다. 여기서 n 은 반복 실험수이며, y_{ij} 는 i 번째 실험점에서 j 번째 반복점에서의 실험결과이다.

이렇게 계산된 S/N 비를 바탕으로 S/N 비에 유의한 제어인자를 판별하기 위해서 Table 5 와 같이 분산분석표 (Analysis of variance, ANOVA)를 작성하였고, 그 결과 필 리미트 밴트 밸브의 오리피스 직경(D)과 연료량(F)은 분산분석표의 F 검정 결과 유의수준 95%에서 유의하지 않는 인자로 나타났다. 다시 말해서, 필 리미트 밴트 밸브의 오리피스 직경(D)과 연료량(F)은 연료 넘침량에 영향을 미치지 않는 제어인자라고 볼 수 있다. 따라서 필 리미트밴트 밸브의 오리피스 직경(D)과 연료량(F)을

오차항으로 풀링(Pooling)하면 Table 6 과 같다. 결과적으로 롤오버 밸브의 위치(A)와 필 리미트 밴트밸브의 위치(B), 탱크의 형상(C) 그리고 롤오버 밸브의 씰 타입(E)만 연료 넘침에 영향을 주는 제어인자라고 할 수 있고, 그 중에서 평균제공합(MS)이 상대적으로 크게 나타난 롤오버 밸브의 위치(A)와 필 리미트 밴트 밸브의 위치(B)가 연료 넘 침에 가장 큰 영향을 주는 제어인자로 볼 수 있다.

3.4.2 주효과도 및 최적조합

각 제어인자에서의 주효과도(Main effect)를 나타내면 Fig. 12 와 같다. 앞 절의 분산분석표에서 F 검정 결과와 같이 유의수준 95%에서 S/N 비에 유의하지 않은 제어인자로 나타난 필 리미트 밴트 밸브의 오리피스 직경(D)과 연료량(F)은 주효과도에서도 다른 제어인자에 비해 상대적으로 수준별 S/N 비에 대한 주효과의 차이가 미미한 것으로 나타나 두 제어인자가 S/N 비에 유의하지 않은 제어인자임을 재확인할 수 있다. 주효과도에서 각 인자의 수준에서 S/N 비에 가장 많은 효과를 보이는 수준을 취합하면 S/N 비에 대한 최적조합이 되고 이 조합은 Fig. 12 에서 보는 바와 같이 A4B4C2D2E2F3 이며, 이들을 정리하면 Table 7 와

Table 8 Initial vs. optimum result

Control Factor		Initial Level	Optimum Level
A	ROV Position	5	4
B	FLVV Position	4	4
C	Fuel Tank Type	2	2
D	FLVV Orifice Size	2	2
E	ROV Seal Type	2	2
F	Fuel Level	1	3
S/N Ratio		1.2494	3.3724
Liquid Carry Over (cc)	Rep. 1	0.5	0.5
	Rep. 2	1.0	0.8
	Rep. 3	1.0	0.7
	Ave.	0.8333	0.6667
	Std.	0.2887	0.1528

같다.

앞 절의 근사최적설계의 결과의 유용함을 검증하기 위해 근사최적설계의 결과인 Table 3 과 다구치 방법의 결과인 Table 7 을 비교하면, 다른 제어인자에서는 동일한 수준으로 나타났지만 연료량(x₆, F)에서만 다른 결과가 나타난 것을 볼 수 있다. 하지만 필 리미트 밴트의 밸브 오리피스 직경(x₄, D)과 연료량(x₆, F)은 분산분석표의 F 검정 결과에서 S/N 비에 유의수준 95%에서 유의하지 않은 제어인자로 밝혀졌기 때문에 필 리미트 밴트의 밸브 오리피스 직경(x₄, D)과 연료량(x₆, F)의 결과는 무의미하며, 따라서 두 설계기법에서의 최적조합의 차이는 통계적으로 무시할 수 있다.

결과적으로 근사최적설계와 다구치 방법을 통해 얻은 최적해는 S/N 비에 유의한 인자들에서 동일한 결과가 나타났으며, 이는 근사최적설계가 랜덤 에러를 가지는 실제 실험결과를 바탕으로 하는 다수준의 이산형 설계변수를 가진 설계문제에서도 유용한 설계기법임을 검증할 수 있다.

3.4.3 결과 검증을 위한 확인시험 및 개선효과

모든 실험점에 대한 S/N 비의 평균값(\hat{u})과 분산분석표의 F 검정을 통해 유의하지 않은 제어인자로 나타난 필 리미트 밴트 밸브의 오리피스 직경(D), 연료량(E)을 제외한 나머지 제어인자들(A, B, C, E)에서 최적수준의 기여량($\hat{a}_4, \hat{b}_4, \hat{c}_2, \hat{e}_2$)을 통해 앞 절의 다구치 방법으로 도출된 최적조합(A4B4C2D2E2F3)에서의 S/N 비 추정치(\hat{S}/N)를 계산하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{S}/N &= \hat{u} + \hat{a}_4 + \hat{b}_4 + \hat{c}_2 + \hat{e}_2 \\ &= 4.0960 \end{aligned} \tag{3}$$

또한 다구치 방법을 통해 도출된 최적조합에서 확인실험을 수행하여 결과를 검증하고 이 결과가 유의한 결과임을 판단하기 위해서 식 (3)에서 계산된 최적조합에서 S/N 비의 추정치(\hat{S}/N) 값에 대한 95% 예측구간을 계산하면 식 (4)과 같다.

$$\begin{aligned} S/N_f &\in \hat{S}/N \pm t_{\phi(e),0.95} \sqrt{\left(k + \frac{1}{r}\right) \cdot V(e)} \\ &\in 4.0960 \pm 2.9594 \\ &\in (1.1366, 7.0554) \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 $\phi(e)$ 는 오차의 자유도이며, $t_{\phi(e),0.95}$ 는 자유도 $\phi(e)$ 에서 95%인 t-분포 값이고, k 는 S/N 비에 유의한 제어인자들의 자유도 합과 총 실험횟수의 비이며, r 은 동일한 실험 조건(같은 실험점)에서 반복 실험횟수이고, $V(e)$ 는 오차의 평균제곱합을 나타낸다. 따라서 식 (4)에서 계산된 최적조합에서의 확인실험에 대한 S/N 비의 95% 예측구간은 1.1366 에서 7.0554 이며, 실제 확인실험 결과에서 최적조합에 대한 실험결과의 S/N 비는 3.3724 로 S/N 비의 95% 예측구간 내의 값을 확인할 수 있었다. 따라서 다구치 방법을 이용한 설계결과가 유의한 결과임을 검증할 수 있다.

두 설계기법을 이용하여 도출되고 확인 실험을 통해 검증된 최적조합과 기존의 설계에서 사용했던 초기값과 비교해 보면 Table 8 과 같고, 그 결과 S/N 비의 기대손실이 약 38.7%가 감소하였다. 그리고 특성치의 평균은 0.8333 에서 0.6667 로 약 20.0%가 감소하였고, 특성치의 표준편차는 0.2887 에서 0.1528 로 약 47.1%가 감소한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차 연료탱크에서 연료가 넘치는 것을 방지하기 위해서 이와 관련된 설계변수들에 대한 최적설계를 수행하였고 그 결과를 검증하였다. 본 연구에서 다른 설계문제는 다수준의 이산형 설계변수를 가지며, 설계변수의 개수가 비교적 많기 때문에 이러한 특성을 가진 설계변수를 보다 효과적으로 다루기 위해 직교배열표를 사용하였다. 그리고 목적함수인 연료넘침량을 얻기 위해 연료 요동 실험장치를 제작하여 실험하였다. 이러한 실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 목적함수를 크리깅 근사모델로 근사화 하였고, 진화 알

고리즘을 이용하여 최적해를 도출하였다. 그리고 근사최적설계의 유용성을 검증하기 위해 다구치 방법으로도 최적조합을 도출하였다. 그 결과, 초기 설계 대비 S/N 비의 기대손실은 약 38.7% 감소하였고, 특성치의 평균과 표준편차는 각각 20.0%, 47.1% 감소하였다.

또한 두 가지 설계기법을 통해 얻어진 최적해는 근소한 차이를 보였지만, 차이를 보였던 제어인자는 분산분석표에서 F 검정 결과에서 유의하지 않은 제어인자로 확인되었기 때문에 그 차이를 무시할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 사용한 근사최적설계가 다수준의 이산형 설계변수이면서 실제 시험 결과를 바탕으로 하는 설계문제를 해결할 수 있는 유용한 공학적 설계기법임을 증명하였고, 여러 개의 목적함수를 갖거나 구속조건이 존재하여 다구치 방법을 적용할 수 없는 설계문제에서 근사최적설계기법이 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0005530).

참고문헌

- (1) Montgomery, D. C., 2005, *Design and Analysis of Experiment*, John Wiley & Sons, NJ.
- (2) Lee, T. H., Lee, K. and Jeong, S. J., 2001, "Optimal Design for the Thermal Deformation of Disk Brake by Using Design of Experiments and Finite Element Analysis," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 25, No. 12, pp. 1960~1965.
- (3) Lee, K. H., Eom, I. S., Park, G. J., Lee, W. I., 1994, "A Study on the Robust Design for Unconstrained Optimization Problems," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 18, No. 11, pp. 2825~2836.
- (4) Hedayat, A., Sloane, N.J.A. and Stufken, J., 1999, *Orthogonal Arrays: theory and applications*, Springer Verlag.
- (5) Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J. and Wynn, H. P., 1989, "Design and Analysis of Computer Experiments," *Statistical Science*, Vol. 4, No. 4, pp. 409~435.
- (6) Back, T., 1996, *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*, Oxford university press, NY.
- (7) Taguchi, G., 1986, *Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes*, Asian Productivity Organization, Tokyo.
- (8) Taguchi, G., 1987, *System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Costs*, UNIPUB/Kraus International Publications, NY.