

신뢰성을 고려한 열유체 시스템의 최적화 설계

오정열*, 허용정**

*한국기술교육대학교 메카트로닉스공학과, **한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

초 록

품질 관리의 목표는 최종제품의 품질 보증에 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 품질 특성이 명확해야 하며, 동시에 품질 특성치에 영향을 주는 공정의 여러 변동 요인을 분명히 해야 한다. 실험계획법(Design of Experiments)은 특성에 영향을 미치는 여러 인자를 선정하며, 또한 이들의 관계를 알아보기 위한 실험을 실시하여 제품의 최적 제조조건을 경제적으로 찾아내는 기법이다. 본 연구에서는 실험계획법을 사용하여 유량을 최적화하는 요인을 선정, 얻어진 데이터를 통계적 방법으로 분석하여 최적의 조건을 나타내었다.

1. 서 론

제품의 품질을 높이고 이를 유지하기 위해서는 제품의 품질 특성값이 이상적인 값 또는 목표값에 가깝게 유지되고 관리되어야 한다. 제품의 품질 특성값에 영향을 주는 인자들과 각 인자가 품질 특성값에 미치는 영향의 정도를 안다면 이를 이용하여 품질 특성값을 목표값에 근접시킴으로써 품질 향상을 이룰 수 있다. 실험계획법(Design of Experiments)은 이러한 목적을 달성할 수 있는 여러 가지 방법 중 하나로써 실험에 대한 계획 방법을 의미한다. 품질 특성에 영향을 미치는 요인들이 어떤 것들인지를 알아보기 위하여 실험의 배치와 실시를 어떻게 하고, 또 얻어진 데이터를 어떠한 통계적 방법으로 분석을 하면 최소의 노력과 비용으로 최대의 정보를 얻을 수 있는가 하는 최적 작업조건을 가장 경제적으로 찾아내기 위한 기법이다.

본 연구의 목적은 설계단계에서 수많은 설계변수가 실제 가능성에 맞게 설계되었는지를 정확히 그리고 신속하게 판단할 수 있도록 실험계획법과 유동해석을 통해 설계의 타당성을 검증하는 것이다. 또한 효율적인 설계와 설계의 검증을 위해 유동 해석 모듈을 기반으로, 그리고 실험계획법을 도입하여 설계자의 설계 목적에 알맞은 설계 변수들의 최적 조합을 구현하는 것에 있다.

본 연구에서 사용한 소프트웨어는 통계 분석에는 Minitab®, 유동해석 및 열전달 해석에서는 Flow Master®를 사용하였다.

2. 시스템의 구성

Fig.1 에서 보듯이 직경 \emptyset in 인 관에 입력값인 유량 Q -in 이 들어가 동일한 직경 \emptyset out 을 갖는 10 개의 관에서 출력 유량 Q -out₁ ~ Q -out₁₀ 이 출력값으로 나오는 시스템이다. 유동 물질은 H₂O 이다.

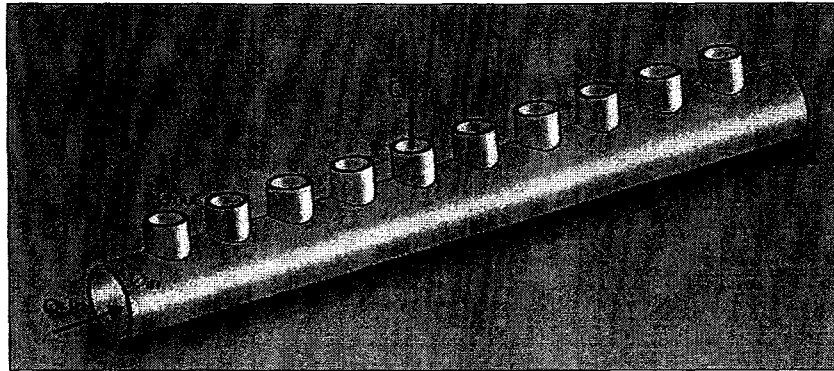


Fig. 1 Definition of the system

3. 실험계획법

3.1 실험 목적의 설정

어떠한 문제를 해결하려고 하는지 기술한다. 본 연구에서는 $Q-out_1 \sim Q-out_{10}$ 이 동일한 유량 Q 로 나오도록 최적화하는 것을 목적으로 한다.

3.2 인자(factor) 선정

실험에 영향을 미치는 많은 원인 중에서 실험의 대상으로 선정된 요인을 인자라고 한다. 인자를 선정할 때 고려할 사항으로는 인자의 각 수준에서 최적조건의 발견이 목적이므로 기술적으로 의미가 있는 인자를 택하여야 한다. 서로 독립적이고 구체적이며, 또는 다른 인자에 영향을 줄 가능성이 있는 인자를 택한다. 본 연구의 인자는 입력되는 유량 $Q-in$, 입력부의 직경 $\emptyset in$, 출력부의 직경 $\emptyset out$ 을 인자로 선정하였다.

3.3 수준(level) 선정

선정된 인자들의 양적·질적으로 구분된 몇 가지 단계를 수준이라고 한다. 본 연구는 $Q-in$ 의 수준은 100 cm^3/s , 150 cm^3/s 로, $\emptyset in$ 의 수준은 4 mm, 10 mm로, $\emptyset out$ 의 수준은 0.2 mm, 1.5 mm, 2 수준으로 선택하였다.

3.4 실험배치법 선택

어떤 실험방법으로 실험하면 신뢰성이 확실한 결론을 능률적으로 얻을 수 있는가를 결정하는 것이다. 본 연구에는 요인배치법(k^n : factorial design)을 사용하였다. 요인배치법은 인자의 수가 n 이고 각 인자의 수준수가 k 인 실험계획법으로, 모든 인자간의 수준의 조합에서 실험이 이루어지는 실험이다. 따라서 실험이 반복되지 않아도 k^n 회의 실험이 실시되어야 한다. 요인배치법을 통한 실험에서는 모든 요인효과의 특징을 추정할 수 있다는 특징이 있다.

3.5 실험의 실시

실험은 FlowMaster[®]를 이용하여 총 8 번 이루어 졌으며 반복 실험을 하지 않았다. CAE 프로그램을 이용하였기 때문에 동일 조건에 반복 실험을 하여도 오차가 존재하지 않기 때문에 반복 실험은 실시하지 않았다.

Q-out	Q-in	Q-out	Q-in	Q-in
6	1	10	0.2	150
7	2	4	1.5	150
4	3	10	1.5	100
3	4	4	1.5	100
1	5	4	0.2	100
8	6	10	1.5	150
5	7	4	0.2	150
2	8	10	0.2	100

Table 1. Order of experiment by using minitab

4. 실험결과 및 분석

Mean 은 Q-out₁ ~ Q-out₁₀ 에서 나오는 유량 Q 의 평균값을 나타내며, 반응인자는 표준편차 (standard deviation ; σ)로 각 데이터가 평균으로부터 얼마나 떨어져 있는지를 나타내며, 다음 식(1)과 같다.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (1)$$

또한 반응인자로 선택한 표준편차는 일반적으로 정규분포를 따르지 않기 때문에 자연로그로 변수 변환을 시킨 후 분석을 실시하였다. 이는 실험모형의 최종 검토인 잔차(residual)가 갖춰야 할 조건을 충족시키기 위함이다.

Q-out	Q-in	Q-out	Q-in	Q-in	Mean	Standard	MS De
1	10	0.2	150	1507.2	0.19	-1.67665	
2	4	1.5	150	18484	2290	7.73631	
3	10	1.5	100	18993	154	5.03695	
4	4	1.5	100	18989	1508	7.31854	
5	4	0.2	100	1004.8	4.85	1.57898	
6	10	1.5	150	18491	238	5.47227	
7	4	0.2	150	1507.3	7.26	1.98238	
8	10	0.2	100	1004.8	0.13	-2.07944	

Table 2. Result of experiment

데이터의 분석은 분산분석(analysis of variance : ANOVA)을 사용하였다. 분산분석은 특성치의 산포를 제곱합으로 나타내고, 이 제곱합을 실험과 관련된 요인마다의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다. 즉, 특성치의 산포를 요인별로 분해하여 어느 요인들이 큰 산포를 나타내고 있는가를 규명하는 방법이라고 할 수 있다

Analysis of Variance for IN(St.De.) (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	3730759	3730759	1243586	*	*
2-Way Interactions	3	1596763	1596763	532254	*	*
3-Way Interactions	1	60589	60589	60589	*	*
Residual Error	0	*	*	*		
Total	7	5388110				

반복 실험을 실시하지 않을 경우는 산포의 추정이 불가능하여, P-value 를 직접 얻을 수 없어 유의 인자 선별이 어렵다. 하지만 실험인자 중에 3 차 혹은 그 이상의 고차(high order)항의 교호인자가 존재하는 경우에 그 교호 인자를 잡음(noise)이라고 가정한다면(pooling), 식 (2)의 Sparsity of effects principle 를 이용하여 표준오차를 추정할 수 있다.

$$S.E. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^g E_i^2}{g}} \quad (g: \text{고차의 교호인자 수}) \quad (2)$$

즉, 풀링(pooling)은 분산분석표에서 F 검정결과 교호작용이 무시할 수 있을 만큼 작으면 유의하지 않는 교호작용을 오차항에 넣어서 새로운 오차항을 만드는 것이다.

다음은 3차항의 교호인자(Q-in* \emptyset in* \emptyset out)을 풀링한 결과이다.

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		3.171	0.002270	1397.24	0.000
pi-in	-2.966	-1.483	0.002270	-653.37	0.001
pi-Out	6.440	3.220	0.002270	1418.69	0.000
Q-in	0.415	0.207	0.002270	91.39	0.007
pi-in*pi-out	0.693	0.346	0.002270	152.66	0.004
pi-in*Q-in	0.004	0.002	0.002270	0.93	0.522
pi-out*Q-in	0.012	0.006	0.002270	2.58	0.235

S = 0.00641939 R-Sq = 100.00% R-Sq(adj) = 100.00%

전체 인자 중 P 값이 5%보다 작은 \emptyset in, \emptyset out, Q-in, \emptyset in* \emptyset out 이 유의한 인자도 나타났다.

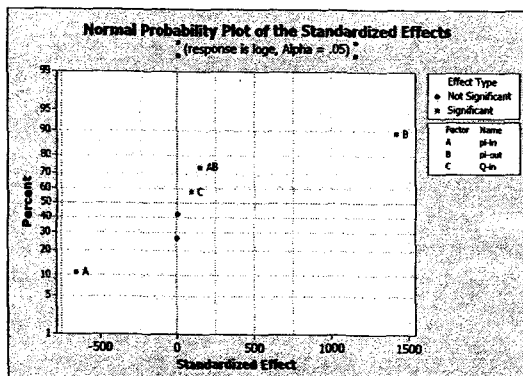


Fig. 2 Normal effect plot

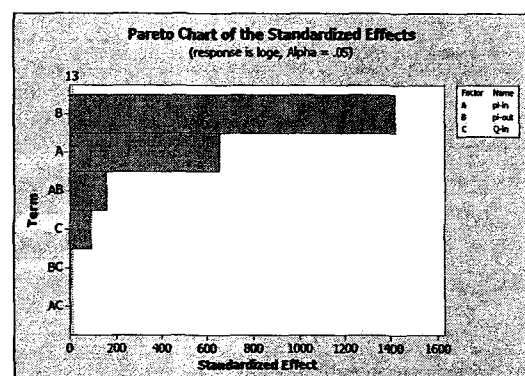


Fig. 3 Pareto Chart

α 값 0.05 에서 Fig. 2 는 정규 확률 플롯으로 직선에서 멀리 떨어질수록 유의한 인자를 나타내며, Fig. 3 은 Pareto 차트로 직선보다 큰 값을 가지는 인자가 유의한 인자이다.

$$Y = 3.17 - 1.48\Phi_{in} + 3.22\Phi_{out} + 0.35\Phi_{in} * \Phi_{out} \quad (3)$$

식(3)은 분산분석 결과를 최적조건을 도출 시키기 위해 수학적 모형을 만든 식이다. 본 연구는 Q-out₁₋₁₀ 에서 동일한 유량이 나오도록 하는 것이 목표이기 때문에 반응 인자로 선택한 표준편차 값이 최소값을 가져야 하므로 식(3)의 Y 값이 최소값을 갖은 조건을 찾아야 한다.

또한 앞의 유의 인자 판별에서 \emptyset in* \emptyset out 이 유의 인자로 판별되었다. Fig.4 는 \emptyset in 과 \emptyset out 의 교호작용은 나타낸 것이며, \emptyset in 는 10 mm, \emptyset out 은 0.2 mm일때 반응 인자 값이 최소인 것을 알 수 있다.

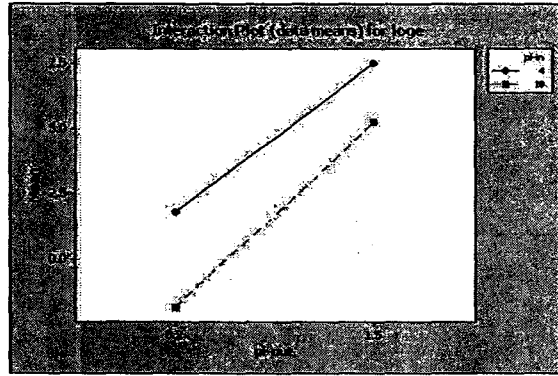


Fig. 4 Interaction plot of $Q_{in} * Q_{out}$

따라서 Q_{in} 100 cm^3/s ~ 150 cm^3/s , θ_{in} 4 mm ~ 10 mm, θ_{out} 0.2 mm ~ 1.5 mm의 조건에서는 Q_{in} 을 100 cm^3/s , θ_{in} 을 10 mm, θ_{out} 을 0.2 mm일 때, Y 값이 최소값을 갖는다.

5. 결 론

본 연구에서는 열 유동 소프트웨어인 FlowMaster[®] 와 통계 소프트웨어인 Minitab[®]으로 실험 계획법을 이용하여 시스템의 최적화를 시도하였다.

(1) 본 연구의 목적은 실험계획법을 이용하여 Q_{out} 이 동일한 유량으로 조정하기 위한 설계 변수들의 최적 조합을 구현하는데 있다. 인자와 수준을 선정, 요인배치법을 사용하여 총 8 번의 실험으로 최적 조건을 통계적으로 증명하였다.

(2) Q_{in} 100 cm^3/s ~ 150 cm^3/s , θ_{in} 4 mm ~ 10 mm, θ_{out} 0.2 mm ~ 1.5 mm의 조건에서 실험 결과 입력부의 직경 θ_{in} 과 출력부의 직경 θ_{out} , 입력 유량 Q_{in} , $\theta_{in} * \theta_{out}$ 이 출력부의 유량 $Q_{out_1} \sim Q_{out_{10}}$ 의 표준편차에 통계적으로 유의한 영향을 미치는 인자로 판명되었다.

(3) 입력부의 직경 θ_{in} 을 10 mm, 출력부의 직경 θ_{out} 을 0.2 mm, 입력유량 Q_{in} 을 100 cm^3/s 로 설정하면 출력부의 유량 Q_{out} 의 표준편차는 0.13 ± 00 정도 발생될 것으로 예측된다.

- ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-02) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] 이기하, 김종원, “ 다구찌방법을 이용한 다축 동시 PID 제어시스템의 제어이득 조정”, 한국정밀공학 회지, 제 16 권, 제 6 호, pp. 25-35, 1999.
- [2] 정원재, 윤형표, 홍순국, 박익민, “ 실험계획법에 의한 승강기용 구동부 구조품의 다이캐스팅 탕구방 안 최적화”, 한국구조공학회, 제 20 권, 제 2 호, pp. 97-103, 2000
- [3] 이병관, 강연식, 양동열, 문재호 “ 다구찌방법을 이용한 디프드로잉 공정의 가공성평가에 대한 연구” 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 938-942, 1996.
- [4] Kang, S.N., Huh, Y.J., “ A Study on intelligent Generator of Mold Temperature Using Fuzzy Algorithm to Prevent Short Shot”, Journal of the Microelectronics & Packaging Society, 8(4), pp. 53-57, 2001.