

실험계획법을 이용한 유체 유동 최적화에 관한 연구

오정열*, 김원년**, 김광철**, 허용정***

*한국기술교육대학교 메카트로닉스공학과, **한국기술교육대학교 교양학부, ***한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

초록

현재까지 실험을 설계하는 방법은 설계자에 의해서 시행착오(trial and error) 방식으로 하는 것이 대부분이었으나 이 방법은 경험상으로 알고 있으며, 유효하다고 생각되는 조건하에서 여러 가지 경우의 것을 시뮬레이션 해보고 그 중에 가장 타당하다고 생각되는 것으로 결정하게 된다. 이들은 다소 경험적인 것이라 할 수 있다. 하지만 실험계획법(Design of Experiments)은 특성에 영향을 미치는 여러 가지 인자를 선정하기 위해, 또 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. 서론

품질관리의 목표는 소비자 만족을 위한 최종제품의 품질보증에 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 품질 특성이 명확하여야 한다. 동시에 최종 특성을 좌우하는 각 제조공정에서 품질 특성에 영향을 주는 공정의 여러 변동 요인을 분명히 하고, 원인과 결과의 인과 관계를 객관적으로 파악하여 최적 제조공정 조건을 선정하는 것이 중요하다. 실험계획법(Design of Experiments)은 이러한 목적을 달성할 수 있는 여러 가지 방법 중 하나로써 실험에 대한 계획 방법을 의미하며, 제품 품질특성에 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. 실험계획법

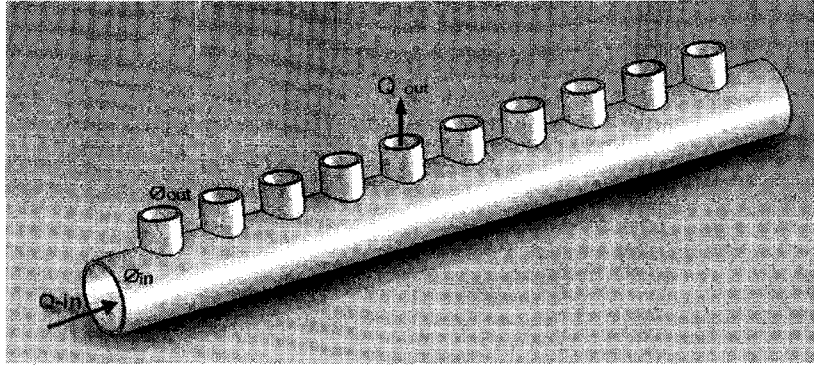


Fig. 1 Definition of the system

(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.

(2) 목표 특성치의 선택

목표특성치는 망목(Nominal-the-Best), 망소(Smaller-the-Better), 망대(larger-the-Better)로 구분된다. 망목특성은 시스템 출력이 도달해야 하는 목표치가 있는 경우이며, 망소특성은 출력이 작을수록 좋은 경우이고, 망대특성은 출력이 클수록 좋은 경우를 말한다. 본 연구의 목표특성치는 $Q-out_1 \sim Q-out_{10}$ 의 표준편차(standard deviation ; σ)로 망소특성에 해당된다. 표준편차는 각 데이터가 평균으로부터 얼마나 떨어져 있는지를 나타내며, 식 (1)과 같다.

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

(3) 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 다른 인자에 영향을 줄 가능성이 있는 인자를 택한다. 본 연구의 인자는 입력되는 유량 $Q-in$, 입력부의 직경 ϕin , 출력부의 직경 ϕout 을 인자로 선정하였다.

(4) 수준(level) 선정

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

(5) 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.

(6) 실험의 실시

Table 1은 실험계획법의 순서에 의해 계획된 조건들을 Minitab[®]에 입력하여 얻은 실험 순서이다. 실험은 Flow Master[®]를 이용하여 총 8번 이루어 졌으며 반복 실험을 하지 않았다. CAE 프로그램을 이용하였기 때문에 동일 조건에 반복 실험을 하여도 오차가 존재하지 않기 때문에 반복 실험은 실시하지 않았다.

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	pi-in	pi-out	Q-in
6	1	1	1	10	0.2	150
7	2	1	1	4	1.5	150
4	3	1	1	10	1.5	100
3	4	1	1	4	1.5	100
1	5	1	1	4	0.2	100
8	6	1	1	10	1.5	150
5	7	1	1	4	0.2	150
2	8	1	1	10	0.2	100

Table 1. Order of experiment by using minitab

3. 실험결과 및 분석

pi-in (mm)	pi-out (mm)	Q-in (cm ² /s)	Mean (mm ² /s)	Standard Deviation
10	0.2	150	1507.2	0.19
4	1.5	150	18484	2290
10	1.5	100	18993	154
4	1.5	100	18989	1508
4	0.2	100	1004.8	4.85
10	1.5	150	18491	238
4	0.2	150	1507.3	7.26
10	0.2	100	1004.8	0.13

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 말할 수 있다.

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-value를 직접 얻을 수 없어 유의 인자 선별이 어렵다. 하지만 실험인자 중에 3차 혹은 그 이상의 고차(high order)항의 교호 인자가 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 * Ø in * Øout)을 풀링한 결과이다.

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		525.3	86.96	6.04	0.104
pi-in	-853.7	-427.2	86.96	-4.91	0.128
pi-out	1043.7	522.2	86.96	6.00	0.105
Q-in	217.3	108.6	86.96	1.25	0.430
pi-in*pi-out	-849.3	-424.3	86.96	-4.88	0.129
pi-in*Q-in	-174.9	-87.5	86.96	-1.01	0.498
pi-out*Q-in	215.7	107.9	86.96	1.24	0.432
S = 246.147 R-Sq = 98.88% R-Sq(adj) = 92.13%					

전체 인자 중 어느 인자도 P값이 5%보다 작지 않아 유의한 인자가 없는 것으로 보인다. 따라서 T값의 절대값이 작은 즉, Q-out의 표준편차에 가장 영향력이 작은 인자 Q-in * Ø in을 다시 풀링하였다.

다음은 2차항의 교호인자 Q-in * Ø in을 풀링한 결과이다.

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		525.3	87.25	6.02	0.026
pi-in	-853.7	-427.2	87.25	-4.89	0.039
pi-out	1043.7	522.2	87.25	5.98	0.027
Q-in	217.3	108.6	87.25	1.25	0.339
pi-in*pi-out	-849.3	-424.3	87.25	-4.87	0.040
pi-out*Q-in	215.7	107.9	87.25	1.24	0.342

S = 246.781 R-Sq = 97.74% R-Sq(adj) = 92.09%

주인자 중 Ø in, Ø out이 유의한 인자이며, 교호작용 Ø in * Ø out 인자가 유의한 인자로 나타냈다

다음은 T값의 절대값이 가장 작은 인자 Q-in * Ø out을 풀링한 결과이다.

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		525.3	94.65	5.56	0.012
pi-in	-853.7	-427.2	94.65	-4.51	0.020
pi-out	1043.7	522.2	94.65	5.51	0.012
Q-in	217.3	108.6	94.65	1.15	0.334
pi-in*pi-out	-849.3	-424.3	94.65	-4.49	0.021

S = 267.639 R-Sq = 96.01% R-Sq(adj) = 90.69%

전과 동일한 결과로 Ø in, Ø out, Ø in * Ø out이 유의한 인자도 나타냈다.

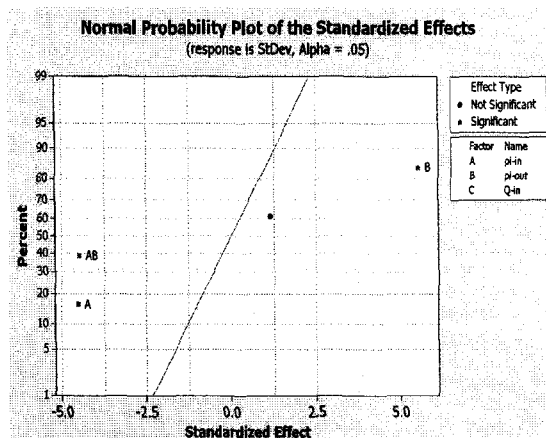


Fig. 2 Normal effect plot

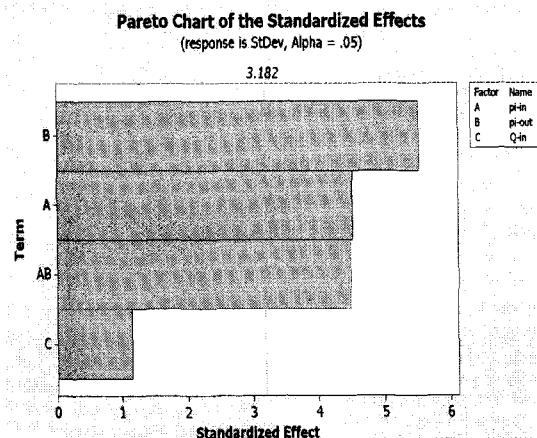


Fig. 3 Pareto Chart

α 값 0.05에서 Fig.3은 정규 확률 플롯으로 직선에서 멀리 떨어질수록 유의한 인자를 나타내며, Fig.4는 Pareto 차트로 직선보다 큰 값을 가지는 인자가 유의한 인자이다.

$$Y = 525.3 - 427.2\Phi_{in} + 522.2\Phi_{out} - 424.3\Phi_{in} * \Phi_{out} \quad (3)$$

위의 식 (3)은 Minitab[®]을 이용한 결과로 최적조건을 도출 시키기 위해 수학적 모형을 만든 식이다. 본 연구는 망소특성을 목표로 하기 때문에 식 (3)의 Y 값이 최소값을 갖는 조건을 찾아야 한다. Φ_{in} 4 mm ~ 10 mm, Φ_{out} 0.2 mm ~ 1.5 mm의 조건에서는 Φ_{in} 을 10 mm, Φ_{out} 을 0.2 mm일 때, Y 값이 최소값을 갖는다.

4. 결 론

- (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 cm³/s ~ 150 cm³/s, Φ_{in} 4 mm ~ 10 mm, Φ_{out} 0.2 mm ~ 1.5 mm의 조건에서 실험 결과 입력부의 직경 Φ_{in} 과 출력부의 직경 Φ_{out} 이 출력부의 유량 Q-out₁ ~ Q-out₁₀ 의 표준편차에 통계적으로 유의한 영향을 미치는 인자로 판명되었다.
- (3) 입력부의 직경 Φ_{in} 을 10 mm, 출력부의 직경 Φ_{out} 을 0.2 mm로 설정하면 출력부의 유량 Q-out 의 표준편차는 약 0.13 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”, 한국정밀공학회지 제16권, 제6호, pp. 25-35, 1999.
- [2] 이병찬, 강연식, 양동열, 문재호 “다구찌방법을 이용한 디프드로잉 공정의 가공성평가에 대한 연구”, 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 938-942, 1996.
- [3] 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
- [4] 이우선, 최신실험설계, 영풍문고, 1998
- [5] 박동규, 최신 실험계획법, 기전연구사, 1999