

연성해석과 통계적 방법을 이용한 Butterfly Valve의 다목적 최적설계

배인환*, 이동화**, 박영철#

Multi-objective Optimization of Butterfly Valve using the Coupled-Field Analysis and the Statistical Method

In Hwan Bae*, Dong Hwa Lee** and Young Chul Park#

ABSTRACT

It is difficult to have the existing structural optimization using coupled field analysis from CFD to structure analysis when the structure is influenced of fluid. Therefore in an initial model of this study after doing parameter design from the background of shape using topology optimization. and it is making a approximation formula using by the CFD-structure coupled-field analysis and design of experiment. By using this result, we conducted multi-objective optimization. We could confirm efficiency of stochastic method applicable in the scene of structure reliability design to be needed multi-objective optimization. And we presented a way of design that could overcome the time and space restriction in structural design such as the butterfly valve with the less experiment.

Key Words : Butterfly Valve(버터플라이밸브), Computational Fluid Dynamics(CFD), Coupled-Field Analysis (연성해석), Orthogonal Array(직교배열표), Analysis of Variance(분산분석), Multiple Regression Polynomial(중회귀 다항식), Multi-objective Optimization(다목적최적설계)

1. 서론

버터플라이 밸브(Butterfly valve)는 비교적 낮은 압력의 가스, 액체의 큰 흐름을 포함하는 개폐와 유량을 조절하는 목적으로 사용되며, 밸브의 오래된 형태 중의 하나로 산업용과 선박용으로 많이 사용되고 있다. 특히 버터플라이 밸브는 게이트밸브, 볼밸브, 글로우밸브보다 중량이 가볍고 공간을 작게 차지하며, 전개에서 전폐의 위치로 전환이 매우

빠르다는 장점이 있다. 또한 최근에는 밸브의 재질이 발달함에 따라 초저온 천연가스의 유량조절과 핵처리장치 퍼지밸브등의 특수용도에 이르기까지 폭넓게 사용되고 있다. 이러한 고온, 고압의 환경조건에서 사용하는 밸브는 기능성과 신뢰성 및 안전성이 보장되어야 하는 중요성으로 인하여 버터플라이 밸브의 설계 및 제조에는 고도의 기술이 요구되고 있다. 이러한 버터플라이 밸브에 관한 내부유동 가시화와 수치적 시뮬레이션에 대한 연구가 보고된 바 있다. Mcpherson¹은 Cohn²이 수립한 밸브의 성능에 관한 자료를 검토하고 버터플라이 밸브의

접수일: 2003년 3월 7일; 게재승인일: 2004년 5월 7일

* (주)키스톤 밸브

** 동아대학교 기계공학과 대학원

교신저자: 동아대학교 기계공학과

Email: parkyc67@mail.donga.ac.kr

유동특성에 대한 연구결과를 발표한 바 있으며, Schweitzer³는 버터플라이 밸브가 개폐와 조절, 조정 용도로 적합하며, 상대적으로 낮은 압력에서 대량의 액체나 가스의 유동을 제어하는 경우에 조작이 빠른 장점이 있음을 언급하였다. Lacor와 Hirsh⁴는 버터플라이 밸브의 디스크 주위에서 Euler 수치 해석코드를 이용하여 수치해석을 행하였으며, Kim과 Wu⁵는 버터플라이 밸브의 비압축성 유동의 유동형태, 속도분포와 배출계수의 평가를 위한 2 차원 수치해석을 수행하였다. Huang과 Kim⁶은 상용 CFD(computational fluid dynamics) 소프트웨어인 FLUENT를 사용하여 난류 유동에 대한 k-ε 모델을 적용하여 비압축성 유동의 3 차원 유동장의 속도와 압력분포를 구하기 위하여 수치해석을 수행하였다.

그러나, 버터플라이 밸브의 유동해석에 대해서는 위와 같이 여러 연구가 진행되어왔으나 아직까지 유체의 유동에 의해 밸브에 미치는 하중을 고려한 최적설계의 연구는 많지 않은 실정이다. 그리고 밸브의 설계에 있어서 유동해석의 어려움과 해석적인 한계로 인하여 민감도에 기반한 기존의 최적설계 기법의 적용에 어려움이 따르고 밸브의 개폐 각도에 따라 유체에 의한 압력이 다르게 작용한다는 것이 일반 구조물과 다르며, 밸브 구조물의 안정성만을 고려하는 것이 아니라 밸브의 전개시 유체의 흐름을 원활하게 하도록 고려하는 설계를 해야하므로 상당한 어려움이 있다. 따라서 기존의 경험을 바탕으로 구조해석 및 설계보완기능, 구조물 내구성 등의 최적설계를 수행할 수 있는 다목적 최적설계시스템이 필요하게 되었다.⁷

최근에는 통계학적 방법을 이용한 실험계획법 (design of experiments)과 연계하여 다목적 최적설계 방법의 적용이 시도되고 있는데, 이는 시스템의 부정확성(inaccuracy)을 체계적으로 문제의 내부에 반영하여 모형에 포함시키고, 불확실성을 동시에 추론하는 방법으로 대두되고 있다. Chen 등^{8,9}은 반응표면법과 확장된 분산분석(analysis of variance)을 이용하여 구조해석과 실험계획법을 조합하는 다목적 문제에 적합한 설계지원시스템을 개발한 바 있고, 백석흠 등¹⁰은 실험계획법과 수리적방법을 이용하여 목적함수에 대한 설계변수의 상관관계를 분산분석으로 파악한 뒤 설계변수의 변화에 따른 평가특성치를 표현할 수 있는 추정식을 이용하여 다목적 최적설계를 수행한 바 있다.

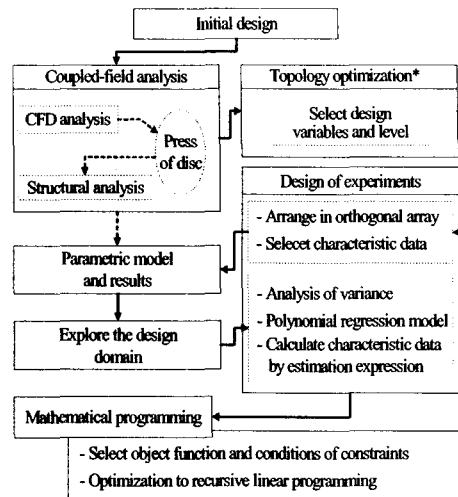


Fig. 1 Procedure of multi-objective optimization

따라서 본 연구에서는 버터플라이 밸브의 디스크에 대하여 안전성과 기능성을 만족하는 설계를 위해서 위상최적화와 CFD-구조 연성해석의 결과를 이용하여 최적설계를 위한 최종 디스크의 모델을 선정한 후에, 실험계획법과 수리적방법을 이용하여 압력 손실계수와 허용응력을 동시에 고려하는 다목적 최적설계를 수행하였으며, 설계변수의 변화에 따른 구조변경의 효과를 정량적으로 평가하였다. 더불어 제안한 다목적 최적설계방법의 유용성을 확인하였다.

2. 통계적 방법을 이용한 다목적 최적설계

직교배열표는 각 반복단계에서 넓은 영역에서 진행되는 영역접근법이다. 따라서 계속되는 설계변경 중에 다른 인자의 변화 또는 관련 부분계의 변화에도 불구하고 설계인자의 추정효과는 계속 타당해야 한다. 다양한 공학문제에 대해 직교배열표를 사용한 결과에 의하면 이 방법은 영역 접근적 특성으로 인해 최적화 초기단계의 경우, 초기 가정치가 최적치로부터 멀리 떨어져 있을 때 매우 효과가 좋은 것으로 알려져 있으나 정밀한 최적해를 구하기에는 부적합하다. 따라서 최적화는 초기단계에서 직교배열표를 사용하고 나중 단계에서 수학적 프로그래밍(mathematical programming)방법을 수행함으로써 정도가 우수한 최적해를 구할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 1은 본 연구에서 제안하는 최적화의 진행 과정을 나타낸 것으로 별표의 위상최적화를 이용하여 해석모델의 구조적 위험영역의 설계변수 선정에 보다 정량적으로 탐색이 가능하였고, 목적함수(평가 특성치)에 대한 설계변수의 영향을 CFD-구조연성해석과 실험계획법을 조합시켜 평가하였다. 그 결과를 분산분석에 기초를 두고서 목적함수의 근사 추정식을 작성하여 다양한 최적화 계산을 전개함으로써 구조설계의 궁극적 목적인 구조물의 통계학적 설계 모델을 구축하였다.

2.1 연성해석의 개요

일반적으로 수행되는 단일 장(field)의 해석은 다른 장에 의한 영향을 무시하고 수행하는 해석이다. 반면에 다른 장의 상태가 명확히 목적의 결과에 영향을 주고 있으며, 또한 결과에 지배적인 영향을 미치고 있는 해석문제를 연성해석문제라 한다. 이러한 연성문제는 열-구조 연성해석문제, 유체-구조 연성해석 문제 등을 예로 들 수가 있다. 전자는 열해석에 의한 온도분포를 구조해석의 온도하중으로 적용하는 것이고, 후자는 유체해석에 의한 정수압을 구조해석의 압력하중으로 적용하는 것이다. 벨브 디스크 해석의 경우는 유체-구조 연성해석을 사용하는 것이 적합하다.

2.2 다목적 최적화

일반적으로 공학설계 문제는 몇 개의 상충되는 목적함수가 존재하여 각 목적함수간에 트레이드오프 함수(trade-off function)를 가지게 된다. 따라서 다목적 문제는 설계자가 가치판단의 정보를 어떻게 취급하는 것에 따라 몇 가지의 파레토(pareto)해에 접근하는 방법이 있다. 그 중 복수의 설계목표간에 우선순위가 존재하는 본 연구에서는 다목적 최적화 알고리즘으로 각 목적함수의 만족수준을 설정하여 우선순위가 높은 것에서부터 순차적으로 단일 목적의 최적화를 반복적으로 실행하는 SLP(sequential linear programming)법을 사용하였다. 즉, r 개의 목적함수가 어떠한 희생을 지불하더라도 만족해야만 하는 요구목표 l 개와 변경될 가능성이 있는 희망목표 m 개로 나누어진 다. 또한 각각의 목적함수의 우선순위가 분명하므로 각각의 목적함수에 대하여 최저 한도로 달성하여야 하는 수준도 설정하여야 한다.

$$\text{요구수준 } F^\epsilon = (F_1^\epsilon, F_2^\epsilon, \dots, F_l^\epsilon)$$

$$\text{희망수준 } f^\epsilon = (f_1^\epsilon, f_2^\epsilon, \dots, f_m^\epsilon)$$

우선, 가장 순위가 높은 요구목표 $F_1(x)$ 에 대하여 아래에 표시한 것과 같은 단일 목적 최적화 문제를 설정하여 최적치 F_1^* 를 얻는다.

$$[1] \text{ Objective function : } F_1(x) \rightarrow \text{minimum}$$

$$\text{Constraints } F_i(x) \leq F_i^\epsilon \quad (i=2,3,\dots,l)$$

$$f_i(x) \leq f_i^\epsilon \quad (i=1,2,\dots,m)$$

$F_1^* > F_1^\epsilon$ 일 때 희망수준 f^ϵ 의 설정을 완화하고 허용한도로서 편차 $\Delta_1(0 \leq \Delta_1 \leq F_1^\epsilon - F_1^*)$ 를 설정하며 다음으로 순위가 높은 요구목표에 대한 목적함수 $F_2(x)$ 에 대하여 최소치 F_2^* 를 얻는다.

$$[2] \text{ Objective function : } F_2(x) \rightarrow \text{minimum}$$

$$\text{Constraints : } F_l(x) \leq F_l^* + \Delta_1$$

$$(0 \leq \Delta_1 \leq F_l^\epsilon - F_l^*) \quad (l=1,2,\dots,p-1)$$

$$F_i(x) \leq F_i^\epsilon$$

$$(i=p+1, p+2, \dots, l)$$

$$f_i(x) \leq f_i^\epsilon$$

$$(i=1,2,\dots,m)$$

$F_p^* > F_p^\epsilon$ 일 때 희망수준 f^ϵ 의 설정을 완화하여 재실행하며 요구목표에 대하여도 동일하게 반복하여 $3 \leq p \leq l$ 에 대하여 순차적으로 최소치를 얻는다. 따라서 추정식에 대한 최적계산을 반복적으로 수행하는 다단계 최적구조설계 방법에 있어서도 위와 같은 수리계획법을 이용하여 용이하게 해석을 수행할 수 있다.

3. 유한요소해석

3.1 해석 대상 및 인자선정

디스크의 해석모델은 직경이 100 mm, 두께가 30 mm인 디스크의 양 끝단이 등근 원판형이다.

유동해석 및 구조해석은 범용 유한요소해석 프

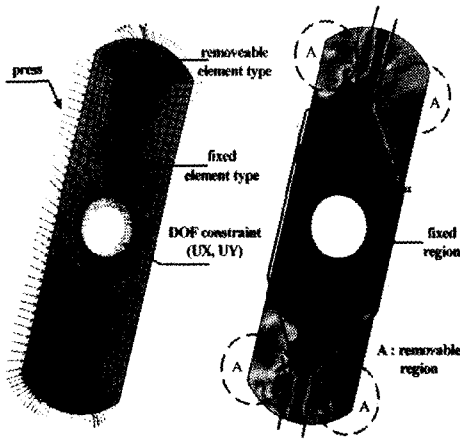


Fig. 2 FE model and topology optimization result

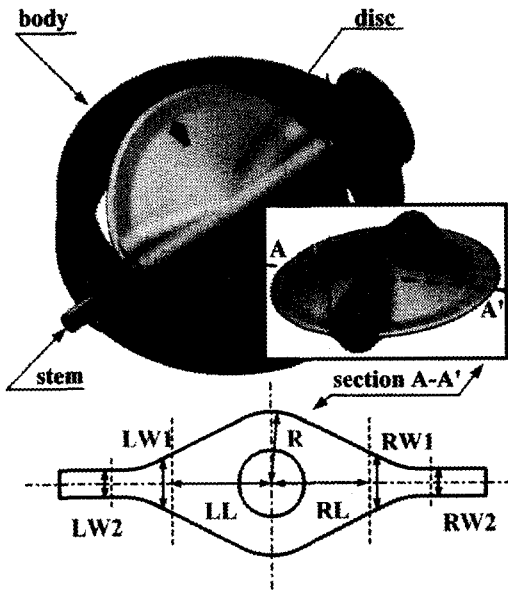


Fig. 3 Design variable of disc (R, RL, LL, RW1, LW1, RW2, LW2)

Table 1 Factor and levels

Factor \ Level	R (mm)	RL (mm)	LL (mm)	RW1 (mm)	LW1 (mm)	RW2 (mm)	LW2 (mm)
1	10	35	20	1	1	1	1
2	15	40	30	2	2	2	2
3	X	45	40	3	3	3	3

로그랩인 ANSYS 5.7을 이용했으며 사용한 요소는 2차원 평면 4절점 사면체 요소를 사용하였고, 요소의 길이는 최대한 상하좌우 같은 크기를 가질 수 있도록 하였다. 위상최적설계의 하중조건과 경계조건은 구조해석과 동일하게 부여하였으며, 최적화 알고리즘은 OC(optimality criteria)를 사용하였다. Fig. 2는 위상최적설계의 유한요소 모델과 경계조건 및 결과를 나타내고 있으며, 이 결과를 이용하여 디스크의 단면의 형상을 결정하고 단면형상에 따른 인자를 선정하였다. Fig. 3은 밸브 단면의 선정된 인자와 버터플라이 밸브의 세 가지 주요 부품인 바디(body), 스템(stem), 디스크(disc)를 나타내고 있다. 선정된 인자는 총 7개이며, Table 1에 선정된 인자와 인자의 수준 수를 나타내고 있다. 인자의 선정은 각각의 인자들에 대하여 각 요인별로 5수준, 7수준 등으로 등간격으로 각각 해석을 실시하여 각 인자에서 최적의 요인들만 선택하여 R은 2수준으로 그 외의 인자들은 3수준으로 하였다.

3.2 특성치의 선정

Fig. 4는 디스크의 유한요소모델과 경계조건 및 응력의 분포를 나타내고 있다. 재료물성치는 STS316의 물성값인 $E = 193 \times 10^3 \text{ MPa}$, $\nu = 0.27$ 을 사용하였다. 구속조건은 가운데의 스템이 들어가는 부분의 x방향 자유도와 y방향 자유도를 구속하였으며, 하중조건은 유동해석 결과에서 디스크가 유체와 접하는 면에서의 압력을 각각의 열림 각도별로 읽어들이어 압력하중으로 적용하였다. 특성치는 디스크의 압력손실계수(pressure loss coefficient)와 디스크의 평균응력으로 하였다. 최대응력은 디스크의 단면변화가 심한 양쪽 끝단 부분에서의 결과값을 이용하였다. 그리고 압력손실계수는 다음 식을 이용하였다.⁶

$$k_1 = \left(\frac{V_1^2}{2} + \frac{P_1 - P_2}{\rho} \right) \frac{2}{V_2^2} - \left(1 + \frac{fL}{D} \right) \quad (1)$$

여기서 P_1 , P_2 는 각각 상부와 하부에서의 정적 압력을 나타내고, V_1 , V_2 는 상부와 하부의 속도를 나타내며, L 은 P_1 과 P_2 사이의 거리, D 는 튜브의 수력반경을, f 는 난류유동에서 원형 파이프의 마찰계수를 나타낸다. 그리고, f 는 유동해석에서 벽면이 매끈한 관이라고 가정을 하였기 때문에 난류유동일

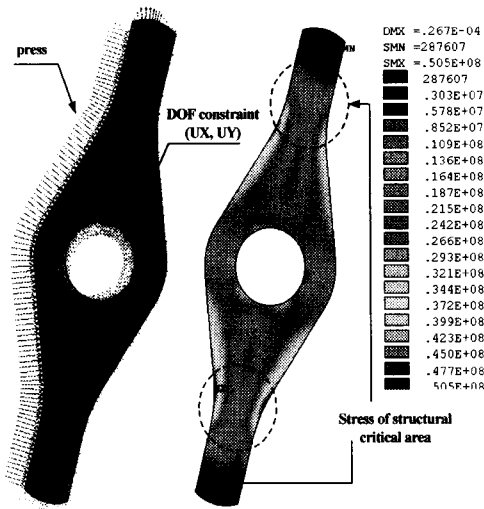


Fig. 4 FE model and stress distribution of disc

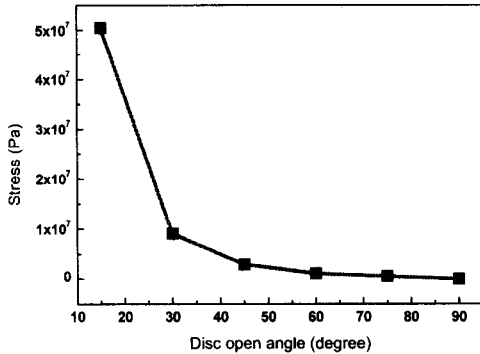


Fig. 5 Graph of stress change in each of opening angle

때 마찰계수에 대한 Moody선도를 참고하여 f 는 0.013으로 대입하여 계산하였다.

Fig. 5는 디스크의 개폐각도에 따른 최대응력을 나타내고 있으며, 디스크의 각도가 15°일 때가 가장 큰 응력이 발생하고 개폐각도가 커질수록 응력이 반비례적으로 감소함을 알 수 있다. 따라서 하중 조건은 가장 가혹한 조건인 디스크의 개폐 각도가 15°일 경우의 압력 값을 적용하였다.

3.3 실험계획법을 이용한 근사 추정식 작성

Table 2는 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 의 혼합직교배열표에 설계

변수를 할당하여 해석결과를 표시한 것으로 이 결과를 기초로 평가특성치에 대한 설계변수의 민감도를 분산분석을 이용해 회귀분석(regression analysis)을 하였다. 회귀분석은 설계변수들의 관련성을 규명하기 위해 수학적 모형을 데이터로부터 추정하는 것으로, 일반적으로 추정된 모형을 이용하여 필요한 예측을 하거나 관심있는 통계적 추론을 하게 된다. 본 연구에서는 유의한 설계변수의 정도(precision)를 중회귀 다항식(multiple regression polynomial)을 이용해서 평가특성치를 표현하였다. 즉 평가특성치인 평균응력, 압력손실계수 등의 직교배열표의 실험에 따른 변화를 설명하기 위해 각 설계변수의 수준영역에서 평가특성치와의 관계가 선형으로 가정되는 회귀모형을 나타낸 것이다.

Table 3은 그 결과의 일례인 평균응력에 대한 결과로서 회귀식 계수에 대한 t 검정으로 t 값이 높은 변수일수록 평가특성치인 평균응력에 대한 민감

Table 2 Result of structure $L_{18}(2^1 \times 3^7)$

No	column									Stress (MPa)	Pressure loss coef.
	R	RL	LL	RW1	LW1	RW2	LW2	e			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1710	0.49548
2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	227	0.77210
3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	58.2	0.93201
4	1	2	1	1	2	2	3	3	3	387	1.02124
5	1	2	2	2	3	3	1	1	1	121	0.64867
6	1	2	3	3	1	1	2	2	2	173	0.62215
7	1	3	1	2	1	3	2	3	3	1070	0.90206
8	1	3	2	3	2	1	3	1	1	197	0.89725
9	1	3	3	1	3	2	1	2	2	79.9	0.49844
10	2	1	1	3	3	2	2	1	1	179	0.86576
11	2	1	2	1	1	3	3	2	2	214	1.35462
12	2	1	3	2	2	1	1	3	3	143	0.63631
13	2	2	1	2	3	1	3	2	2	152	1.01242
14	2	2	2	3	1	2	1	3	3	545	0.58393
15	2	2	3	1	2	3	2	1	1	92.7	0.92855
16	2	3	1	3	2	3	1	2	2	441	0.67556
17	2	3	2	1	3	1	2	3	3	102	0.60086
18	2	3	3	2	1	2	3	1	1	729	0.99214

도가 크다는 것을 의미하는데, 다항식의 성분을 분산 분석의 결과에 기초를 두고 있어 고차항의 계수를 모르거나 계수차이가 크게 되더라도 기저(base)를 정규화(normalize) 할 수 있어 효율적으로 탐색이 가능하다." 유한요소 해석결과와 회귀변동 사이에 오차비율이 평균 응력인 경우 13.5 %, 2 차식인 경우 15.7 %이며, 손실압력계수인 경우는 1 차식이 1.19 %로 유효함이 나타났다. 따라서 본 연구의 특성치의 회귀변동식은 1차식이 더 유용함을 알 수 있다. 그리고, 식 (2), (3), (4)는 직교 배열표상의 불연속 변수점에 의한 결과를 이산 연속함수적인 중회귀

$$Y_{stress}^{1st} = 2121.989 - 158.378x_1 + 7.308x_2 - 221.933x_3 - 82.7x_4 - 312.408x_5 + 40.008x_6 - 108.558x_7 \quad (2)$$

$$Y_{stress}^{2nd} = 3539.8 - 158.4x_1 - 728.9x_2 - 184.1x_2^2 - 1022.9x_3 - 200.2x_3^2 + 1031.6x_5 - 179.8x_5^2 \quad (3)$$

$$Y_k = 0.279 - 9.564 \times 10^{-2}x_1 - 4.1 \times 10^{-2}x_2 - 3.0 \times 10^{-2}x_3 - 2.7 \times 10^{-2}x_4 - 3.3 \times 10^{-2}x_5 + 9.808 \times 10^{-2}x_6 - 0.223 \times 10^{-2}x_7 \quad (4)$$

Table 3 Variance analysis of multiple regression polynomial for stress

Factor	Unstandardized		Std. coeff.	T-ratio	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
Const.	221.989	498.666		4.255	0.002
R	-158.378	147.049	-0.191	-1.077	0.031
RL	7.308	90.049	0.014	0.081	0.937
LL	-221.933	90.049	-0.437	-2.465	0.033
RW1	-82.700	90.049	-0.163	-0.918	0.380
LW1	-312.408	90.049	-0.616	-3.469	0.006
RW2	-40.008	90.049	-0.079	-0.444	0.666
LW2	-108.558	90.049	-0.214	-1.206	0.256
Model	Sum of squares	DOF	Mean square	F-ratio	Sig.
Regression	2118456	7	302636.5	3.110	0.051
Residual	973049.5	10	97304.95		
Total	3091505	17			

방정식으로 나타낸 결과가 되므로 최적 해의 수렴성 및 정도를 좋게 할 수 있을 것으로 기대된다. 즉, 불연속 변수점이 아닌 그 변수 점들 사이에 만약 최적해가 존재한다면 그 결과는 직교 배열표상의 변수에서 선정 할 수밖에 없으며, 이는 초기 인자 및 수준 수 선정에 따라 그 최적해가 동일한 모델에 대해서 작업자의 선택에 따라 그 결과가 달라질 수 있는 경우가 발생할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 결과를 피하기 위해 중회귀 분석 및 직교 다항식을 통해 실험 및 해석결과를 대변할 방정식을 수립함으로써, 작업자에 따라 달라질 수 있는 인자 및 수준수의 유의성을 평가하고, 최적해로의 수렴성 및 정도를 좋게 할 수 있음을 알 수 있다.

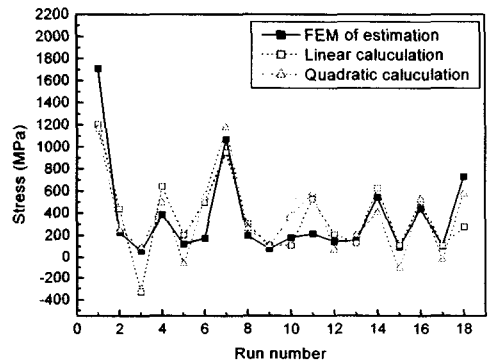


Fig. 6. Relation between stress and run number in DOE

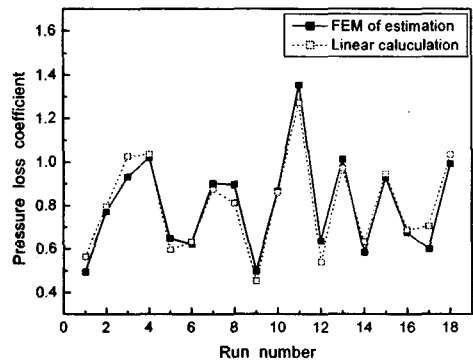


Fig. 7. Relation between pressure loss coefficient and run number in DOE

통계프로그램으로 SPSS base 7.5를 사용하였으며,¹² 이상에서 얻어진 목적함수의 근사 추정식과 해석 값을 비교한 그래프를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 따라서 이러한 추정식을 기초로 밸브의 다목적 최적화를 수행한다.

4. 수리계획법을 이용한 다목적 최적화

4.1 요구목표 설정

다목적 최적화 문제를 수학적으로 표현하면 아래와 같이 설정할 수 있다.

Objective function : minimize { Y_{stress} , Y_{kl} }

Constrains : $1 \leq x_1 \leq 2$

$1 \leq x_i \leq 3 \quad (i=2, 3, 4, 5, 6, 7)$

4.2 최적화 계산

버터플라이 밸브에 대한 목적함수에 우선순위를 두기 위해 평균응력을 1 순위, 압력손실계수를 2 순위로 했으며, 각 목적함수는 변경 가능한 회귀 목표를 평균응력은 항복강도기준 안전율 1.5를 적용한 136.7 MPa, 압력손실계수는 0.8로 설정해서 적용하였으며, 각 목적함수의 회귀수준을 각각

Y_{stress}^e , Y_k^e 로 선정하고, 우선 순위가 높은 순서부터 최적화 계산을 실행하였다. 그리고, 최적화 계산으로는 SLP를 사용하였다.

[1] First step

Objective function : $Y_{stress}^e \rightarrow \text{minimum}$

Constrains : $Y_k^e \leq 0.8$

$1 \leq x_1 \leq 2, 1 \leq x_i \leq 3 \quad (i=2,3,4,5,6,7)$

첫 번째 단계에서 얻어진 최적해 Y^* 를 Table 5에 나타내었으며 다음으로 얻어진 최적해에 편차 Δ ($\Delta = |Y^* - Y^e|/2$)를 더해서 최적 계산을 실행하였다.

[2] Second step

Objective function : $Y_k^e \rightarrow \text{minimum}$

Constrains : $Y_{stress}^e \leq 136.7 + 1.305$

$1 \leq x_1 \leq 2, 1 \leq x_i \leq 3 \quad (i=2,3,4,5,6,7)$

Table 4 Optimal solution

Objective Step	Stress (MPa)	pressure loss Coefficient
Initial	25.6	1.5779
First step	134.09	0.4755
Second step	112.95	0.6354

Table 5 Optimal design parameter

DV Result	X ₁ (R) (mm)	X ₂ (RL) (mm)	X ₃ (LL) (mm)	X ₄ (RW1) (mm)	X ₅ (LW1) (mm)	X ₆ (RW2) (mm)	X ₇ (LW2) (mm)
Opt. level	1.249	1.006	2.422	1.532	3.0	1.24	1.658
Opt. size (mm)	11.245	35.032	34.218	1.532	3.0	1.24	1.658

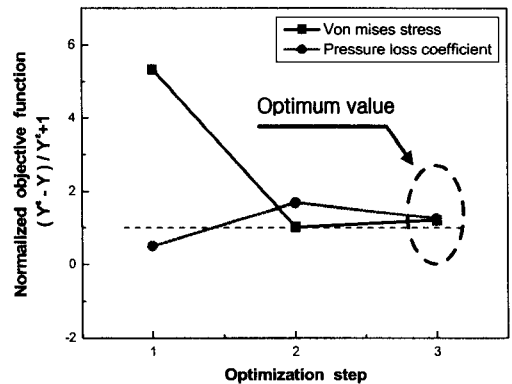


Fig. 8 Multi-objective optimization process using SLP

위의 두 단계의 과정 중에서 얻어진 해가 바로 다목적 최적해가 되며, 그 값을 Table 4와 5에 나타내었다. 또한 Fig. 8은 각 단계에 의하여 최적화가 진행되는 상태를 나타내었는데 여기서 종축은 회귀수준으로 나누어 정규화 하였고, 정규화된 목적함수가 1을 넘으면 목적함수가 요구수준을 만족하고 있다는 것을 의미하며, 초기설계는 평균응력은 만족되지만 압력손실이 만족되지 않고 있기 때문에 최적설계를 단계별로 진행 해 본 결과 세 번째 단계에서 그 최적해가 나타남을 알 수 있다.

Table 6 Reanalysis solution

Objective Kind	Stress (MPa)	Pressure loss coefficient
Optimized result	112.95	0.6354
Reanalysis	126.3	0.6759

Table 6은 얻어진 최적해에 대하여 재해석을 수행하여 나타낸 것이다. 최적해와 재해석을 비교해 보면 오차가 발생하였는데 평균응력은 12 %, 압력손실계수는 1.31 %의 오차가 발생되었으며 이것은 목적함수의 추정식이 가지는 오차의 원인에 의한 것으로 생각된다. 따라서 추정식의 향상과 외측직교배열의 사용으로 이러한 변동의 강건성(robustness)을 고려하면 오차요인에 다소 편차가 있다고 하더라도, 성능이 변동하기 어렵고 안전성이 높은 제품을 개발할 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 버터플라이 밸브의 최적설계를 실험계획법과 수리적 방법을 이용하여 다목적 최적설계를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 버터플라이 밸브의 목적함수에 대한 근사 추정식에서 압력손실계수는 수리적 모형 식과 해석 값이 거의 동일한 결과를 나타내었고, 응력의 경우는 비교적 많은 오차가 발생하였으며, 이것은 인자 수준의 범위가 적절하지 못했기 때문인 것으로 판단된다.
- 2) 구조해석과 실험계획법을 이용하여 평가 특성치와 설계변수의 상관관계를 분산분석을 이용하여 근사 추정식인 다항식으로 나타냄으로써, 이 식을 중심으로 실용성이 있는 다목적 최적설계의 전개와 수행이 가능하였다.

후기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참고문헌

1. Mcpherson, M. D., Strausser, H. S., Williams, J.

C., "Butterfly Valve Flow Characteristics," J. Hydraulic Division ASCE, Vol.83, pp. 1167.1-1167.27, 1951.

2. Cohn, S. D., "Performance Analysis of Butterfly Valves," Instruments, Vol.25, pp.880-884, 1951.

3. Schweizer, P. A., Handbook of Valves, Industrial Press Inc, pp. 93-103, 1972.

4. Lacor, C., Hirsch, C., "Numerical Simulation of the Three-Dimensional Flow around a Butterfly Valves," ASME Fluids Eng. Div. Publ. FED. Vol. 69, Flows in Non-Rotating Turbomachinery Components, 1988.

5. Kim, R. H., Wu, N. Y., "Numerical Simulation Butterfly Valve Fluid Flow," proceedings of the FLUENT User's Group Meeting, pp. 296-313, 1992.

6. Kim, R. H., Huang, C., "3-D Analysis Butterfly Valve Fluid Flow," Proceedings of the FLUENT User's Group Meeting, pp.43-57, 1993.

7. Lee, J. B., Lee, B. C., "Multi-objective Optimization of Fuzzy System using Membership Function Defined by Normed Method," Transaction of the KSME, Vol. 17, No. 8, pp. 1898-1909, 1993.

8. Chen, W., Allen, J. K., Mavris, K. N., Mistree, F., "A Concept Exploration Method for Determining Robust Top-Level Specifications," Engineering Optimization, Vol. 26, pp. 137-158, 1996.

9. Chen, W., Allen, J. K., Tsui, K. L., Mistree, F., "A Procedure for Robust Design Minimizing Variations Caused by Noise Factors and Control Factors," Journal of Mechanical Design, Vol. 118, pp. 478-485, 1996.

10. Baek, S. H., Lee, D. W., Lee, K. Y., Cho, S. S., Joo, W. S., "Application of Sequential Quadratic Programming on Multi-objective Optimization using the Stochastic Meshod," Proceedings of the KSME 2002 Spring Annual Meeting, pp. 954-961, 2002.

11. Qiang, YU, Hideoki, Y., Takeshi, Y., Masaki, S., Keiichi, M., "Multi objective Optimization of Reinforced Members for Crash Safety Design of Automobiles," JSME(A), Vol. 66, No. 641, pp. 1-6, 2000.

12. SPSS Base 7.5 for windows User's Guide, SPSS Inc, Chicago IL., 1997.