

직교배열표와 특성함수를 이용한 Butterfly Valve의 최적설계

강진*(동아대 대학원 기계공학과), 최종섭(동아대 대학원 기계공학과),
박영철(동아대 기계공학과)

A Optimization of Butterfly Valve using the Orthogonal Array and the Characteristic Function

J. Kang(Mech. Eng. Dept., DAU), J. S. Choi(Mech. Eng. Dept., DAU),
Y. C. Park(Mech. Eng. Dept., DAU)

ABSTRACT

The butterfly valve has been used to control a flow effectively in the industrial because of its lightweight, simple structure and the rapidity of its manipulation. However, it is difficult to have the existing structural optimization using field analysis from CFD to structure analysis when the structure is influenced by fluid. This paper is evaluated the specificity to get the flow characteristic and stability of the butterfly valve using FEM and CFD. Also, it accomplished the shape optimization design using the orthogonal arrangement and characteristic function. Research result, a few experiments showed the optimal results of three dimensional structures to be multi-objective.

Key Words : Butterfly Valve (비터플라이밸브), Computational Fluid Dynamics (전산유동해석), Orthogonal Array (직교배열표), Characteristic Function (특성함수), Analysis of means (평균 분석)

1. 서론

현대의 육상과 해상, 모든 산업현장에서 필수적으로 요구되는 효과적인 유량 제어를 위해서는 많은 종류의 밸브가 사용된다. 그중 비터플라이 밸브(Butterfly valve)는 원관 내부의 디스크를 회전시킴으로써 유량을 조정하는데, 밸브구경 대비 노즐면간 거리가 큼백트하여 중량이 가볍고 공간을 작게 차지하며, 진개에서 진폐로의 전환에 매우 간단하고 빠르다는 장점이 있다. 그러나, 디스크의 각도에 따라 유체가 위형 관을 지나는 단면적이 크게 달라지므로 이로 인한 압력 차이에 의해 유속의 변화가 심하게 되고 밸브 후류는 일정한 유동패턴이 없는 복잡한 단류 형태가 된다. 따라서 고온, 고압의 환경조건에서 사용하기 위해서는 기능성과 안전성이 동시에 요구되므로, 비터플라이 밸브의 구조적 안전성을 확보하면서 밸브의 유동특성을 고려하여야 한다.

밸브의 유동 특성 연구와 관련하여 Addy,

Morris and Dutton(1985)는 밸브 주위의 유동을 1차원의 돌연 확대부로 가정하는 이론적 모델을 제시하였고, Lacor and Hirsh(1988)는 비터플라이 밸브의 디스크 주위에서 Euler 수치 해석코드를 이용하여 수치 해석을 행하였으며, Kim and Wu(1992)는 비터플라이 밸브의 비압축성 유동의 유동형태, 속도분포와 배출계수의 평가를 위한 2차원 수치해석을 수행하였다. 이 외에도 밸브의 유동특성만을 고려한 연구는 많이 수행되어왔지만 아직까지 유체의 유동 특성을 고려한 밸브의 최적설계는 연구되지 않는 실정이다.

최근에는 통계학적 방법을 이용한 실험계획법과 연계한 최적설계의 개념이 도입되고 있다.(Fernier and Svensson, 2001) 이는 시스템의 무정확성(inaccuracy)을 체계적으로 문제의 내부에 반영하여 보형에 포함시키고, 분화설정을 동시에 추론하는 방법으로 대두되고 있다. Chen, Allen, Tsui and Mistree (1996)은 반응표면법과 확장된 분산분석(analysis of variance)을 이용하여 구조해석과 실험계획법을 조합

하는 나垢적 문제에 적합한 설계지원시스템을 개발한 바 있다.

본 연구에서는 비터플라이 벤브의 유통특성과 구조적 안정성을 확보하기 위하여 구조해석과 유통해석을 수행하였고, 실험계획법(design of experiments)의 일종인 직교배열표(orthogonal array)를 이용하여 디스크의 최적설계를 수행하였다. 그러나 직교배열표는 제한조건함수를 고려할 수 없으므로 특성함수(characteristic function)를 도입하였다. (Lee and Park, 1998) 이 특성함수는 압력손실계수와 응력을 동시에 고려한 것이고, 이 특성치에 대한 평균분석(analysis of means : ANOM)을 통하여 최적해를 정량적으로 평가하였다.

2. 특성함수를 이용한 제한조건의 문제

2.1 특성함수

실제적인 최적설계의 문제에서는 여러 가지 목적함수가 동시에 고려되어야 하나, 직교배열표에 의한 행렬실험으로부터 얻어지는 목적함수의 결과치는 최적설계에 취급되어지는 제한조건을 포함하지 않고 있다. 따라서 응력과 같은 하나의 목적함수의 사항만으로는 최적설계 문제에 있어서 결과를 평가할 수 없다. 이를 디스크의 최적설계문제로 정식화시키면 식(1)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } W \\ & \text{Subject to } \sigma_i \leq \sigma_a \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 W 는 중량을, σ_i 는 직교배열표의 실험에서 얻어지는 응력의 특성치를, σ_a 는 응력에 대한 한계를 나타낸다. 특성함수는 직교배열표의 각 실험에서 제한조건의 가능성(feasibility)이 포함될 수 있도록 한다.

먼저, 식 (2)와 같이 제한조건함수의 유용성을 처리할 수 있는 별칙함수 $P(x)$ 를 정의한다. 별칙함수는 직교배열표의 실험결과에 의한 특성치와 제한조건의 위배량에 따라 계산된다.

$$P(x) = k \cdot \sum_{j=1}^m \text{Max}[0, g_j] \quad (2)$$

여기서 g_j 는 제한조건함수를 나타내고, k 는 별칙계수를, m 은 부동식조건의 개수를 나타낸다. 별칙계수 k 는 목적함수 및 별칙함수의 기여도를 조절하는 역할을 한다. 위 식에서 제한조건을 만족시킬 경우 별칙함수는 영의 값을 갖게 되고 제한조건을 위배할 경우 위배량인 $k \times g_j$ 만큼의 값을 갖게 된다. 별칙계수에 따라 설정된 제한조건을 모두 만족 할 경우도 있지만 이러한 결과는 특성함수에서 목적함

수의 영향을 무시하는 결과를 얻을 수 있기 때문에 원래 목적함수에 비해 별칙항이 한차원 낮도록 값을 부여하였다. 이로써 특성함수 Ψ_{new} 는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\Psi_{\text{new}} = \frac{W_0}{W_0} + k \cdot \sum_{j=1}^m \text{Max}\left[0, \frac{\sigma_j}{\sigma_a} - \epsilon\right] \quad (3)$$

여기서 W_0 는 초기중량을 나타내고, k 는 별칙항을 나타내고 있다.

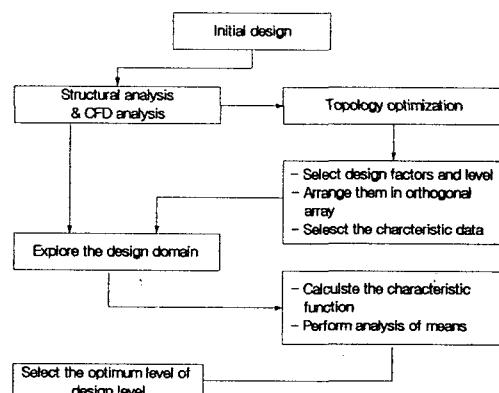


Fig. 1 Process of application design optimization

2.2 최적설계 방법

특성함수를 이용하여 최적설계를 수행하기 위하여 초기의 비터플라이 벤브를 유통해석과 구조해석을 수행한 후, 직교배열표를 선택하여 설계변수와 각 설계변수의 수준수가 결정되어지면 직교배열표에 의한 각 행렬에 대한 해석을 수행하게 된다. 그러면 이에 대한 목적함수를 구할 수 있다. 구해진 목적함수에 대하여 특성함수를 이용하여 하나의 특성치를 구할 수 있으며, 특성치에 대한 평균분석을 이용하여 최적해를 얻을 수 있다. Fig. 1은 제시된 과정의 순서도를 나타낸다.

3. 초기 모델의 구조 및 유통해석

3.1 해석모델

본 연구에서는 비터플라이 벤브의 디스크 형상을 최적화시키는 것을 목적으로 한다. 비터플라이 벤브를 최적설계하기 위한 초기모델을 Fig. 2에 나타내었다.

법용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 8.1을 이용하여 구조해석을 수행하였고, ten-node tetrahedral 요소를 사용하였다. 그리고 유통해석은 법용 CFD 프로그램인 CFX 5.7을 이용하였으며, tetrahedron과 prism요소를 사용하였다. Fig. 3은 구조해석에서의 하중조건과 구속조건을 나타내고 있다. 그림에서 알 수

있듯 전체 모델이 중심을 기준으로 상하좌우가 대칭

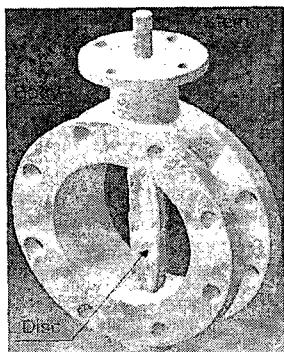


Fig. 2 Configuration of butterfly valve

이므로 1/4만 모델링하여 대칭면에 symmetry 구속을 주고, 디스크와 스템 연결부에 완전구속을 주었다. 하중은 디스크와 유체가 접하는 부위에 ANSI B16.34에서 규정하는 285 psi($=1.965 \text{ MPa}$)를 적용하였다. 그리고 디스크의 사용 재료인 ASTM A296 CF8M의 물성값인 $E=193 \times 10^3 \text{ MPa}$, $\nu=0.27$ 을 사용하였다.

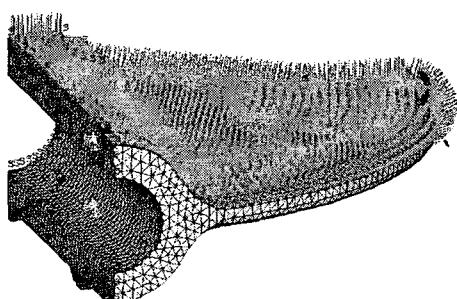


Fig. 3 Load and boundary condition of analysis

Fig. 4는 유동해석에서의 여러 경계조건을 나타내고 있다. 유동해석을 위한 내부 유체는 비침성 비압축성 유체인 상온(20°C)의 물을 사용하였으며, 유동장은 Yada, Sakurai and Takeda(1984)와 Antoku and Sakurai(1984)의 수치해석과 Kimmura(1995)의 실험에서 알 수 있듯이 레이놀드수가 4000을 넘는 단류기동을 하므로 단류유동 모델인 벽함수(wall function)를 사용하는 $k-\varepsilon$ 모델을 이용하여 계산하였다. 단류관운동에 대한 마찰계수는 레이놀드수와 상대조도에 의존하나 해석에서는 실제로 설치될 밸브와 연결되는 모든 관에 대하여 고려할 수 없기 때문에 매끈한 관이라 설정하고 해석을 수행하였다. 밸브 입구속도는 미국수도협회(AWWA)의 규정 최고속도인 16ft/s (4.8768 m/s)를 적용하였고, 출구는 대기압으로 설정하였다. 그리고, 유동모델은 XY 평면에 대하여 대칭을 이루므로 symmetry 구속을 주었다. 그리고 해석에서

밸브 하류유동의 패턴은 하류부분의 관의 길이가 증가함에 따라 면하므로 유동이 완전히 발달하는 10D의 거리를 적용하여 해석을 수행하였다.(Kim and Huang, 1993)

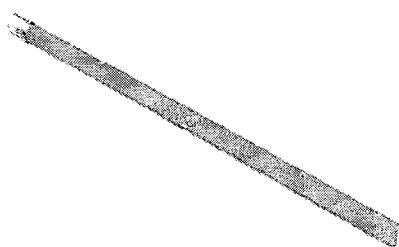


Fig. 4 Boundary conditions in fluid analysis

3.2 초기 모델의 해석 결과

Fig. 5에서는 초기 형상의 디스크의 구조해석 결과를 나타내었다. 해석결과에서 알 수 있듯이 디스크와 스템 결합부로 두께가 얇아지기 시작하는 부위에서 최대응력이 발생하게 된다. 그리고 Fig. 6에서는 초기 형상의 유동해석 결과를 나타내었다. 유동특성 중 하나인 압력손실계수를 구하기 위하여 밸브를 Full open(90°)하였을 때 발생하는 압력과 속도를 나타내었다. 압력은 유체가 디스크를 통과하면서 감소하는 경향을 나타내고 속도는 디스크를 통과할 때 관로가 좁아지기 때문에 증가하였다가 디스크를 통과하게 되면 다시 감소하는 것을 알 수 있다.

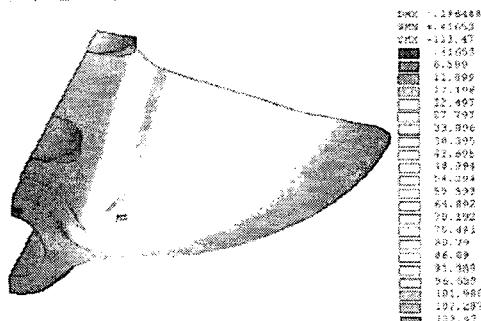


Fig. 5 The result of structure analysis

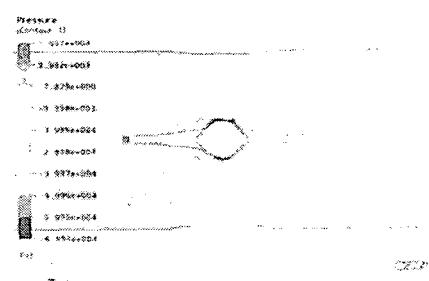


Fig. 6(a) Pressure distribution of fluid analysis

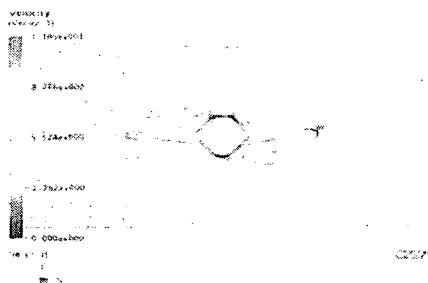


Fig. 6(b) Velocity distribution of fluid analysis

3.3 설계변수 및 수준수

기존의 디스크의 해석 결과를 바탕으로 용력과 유체의 흐름에 영향을 미치는 디스크의 각 부위에 설계변수 A, B, C, D, E, F, G의 6곳을 선정하여 Fig. 7에 나타내었다. 그리고 Table 1에 설계변수와 수준수를 나타내었다. 이때 직교배열표는 L18(2¹×3⁷) 직교배열표를 선택하였다. 이 직교배열표는 교호작용을 구하지 않고, 인자만 배치한 것으로 3수준의 열들(열번호 2~8)간의 교호작용은 L12(2¹¹)에서와 유사하게 3수준의 다른 열들에 균등하게 나누어져 있다. 이 직교배열표는 2수준 인자 하나와 3수준 인자 일곱 개 이하인 경우에 유용하게 사용할 수 있는 장점이 있다. 설계변수는 2열에서 7열까지 배치하였으며, 나머지 열은 오차항으로써 배치하였다.

그리고 특성치로서 최대용력, 압력손실계수와 중량을 선정하였다.

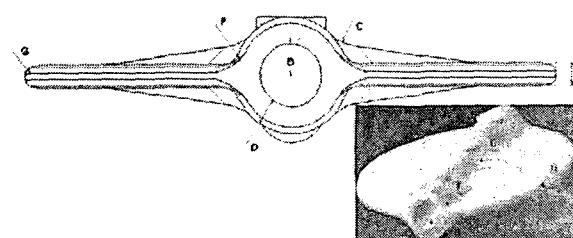


Fig. 7 Design variable of disc

Table 1 Design factor and level

	D	E	A	B	C	D	F	G
Level	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
1	7	12	12	8.5	10.7	2		
2	8	13.5	16	9.5	12.7	2.4		
3	9	15	20	10.5	14.7	2.8		

3.4 직교배열표에 의한 해석결과

Table 2는 혼합직교배열표를 이용한 구조해석 결과를 나타낸 것으로 설계변수의 각 수준수의 배치에

따른 최대용력, 압력손실계수와 중량을 나타내고 있다. 본 논문에서 디스크를 최적화 시키기 위하여 용력의 목표값을 안전율 1.5를 적용하여 136.67 MPa, 압력손실계수의 경우 0.45를 목표값으로 설정하였다. 그 결과 용력에서는 1번제 실험의 경우만을 제외하고는 모두 목표용력을 만족하지만, 압력손실계수의 경우 1, 2, 6, 8, 11, 12, 13, 15, 18의 실험이 목표압력 손실계수를 만족하는 것을 알 수 있다.

Table 2 Analysis result according to orthogonal array L18(2¹×3⁷)

Exp.	e	A	B	C	D	F	G	e	Stress (MPa)	Pressure t (Kg)	Weigh
1	1	1	1	1	1	1	1	1	138.61	0.404694	2.840
2	1	1	2	2	2	2	2	2	127.09	0.442956	3.055
3	1	1	3	3	3	3	3	3	115.82	0.491582	3.274
4	1	2	1	1	2	2	3	3	129.57	0.452844	3.133
5	1	2	2	2	3	3	1	1	107.26	0.457898	3.357
6	1	2	3	3	1	1	2	2	101.72	0.434668	3.144
7	1	3	1	2	1	3	2	3	115.16	0.450685	3.168
8	1	3	2	3	2	1	3	1	94.8	0.409267	3.376
9	1	3	3	1	3	2	1	2	89.82	0.467527	3.546
10	2	1	1	3	3	2	2	1	129.38	0.466591	3.174
11	2	1	2	1	1	3	3	2	117.26	0.395473	2.903
12	2	1	3	2	2	1	1	3	127.35	0.432105	3.112
13	2	2	1	2	3	1	3	2	120.93	0.447440	3.290
14	2	2	2	3	1	2	1	3	108.04	0.473015	3.088
15	2	2	3	1	2	3	2	1	94.98	0.448294	3.254
16	2	3	1	3	2	3	1	2	108.75	0.461247	3.328
17	2	3	2	1	3	1	2	3	106.88	0.483458	3.488
18	2	3	3	2	1	2	3	1	88.16	0.448656	3.286

4. 디스크의 최적설계

4.1 특성함수의 정의 및 계산

Fig. 8은 용력과 압력손실계수, 용력과 중량의 관계를 그래프로 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 110 MPa 균치에서 높은 압력손실계수가 발생하고, 용력이 낮을수록 중량이 높게 나오는 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 결과만으로는 직교배열표는 2 가지 이상의 무작위수에 대한 제한 조건을 평가할 수 없다. 직교배열표상의 용력과 압력손실계수의 관계에서 용력의 기준치를 만족하면서 압력손실계수가 가장 낮은 것은 11번제의 실험이라고 볼 수 있다. 하지만 이것은 정량적인 평가가 되지 않는다. 제한조건이 있는 문제에서의 직교배열표의 사용은 제한조건이 없는 문제와 동일하게 직교배열표에 의한 해석법이 사용되지만 제한조건의 유용성이 포함될 수 있도록 평가추정식의 작성이 요구된다. 따라서 설계문

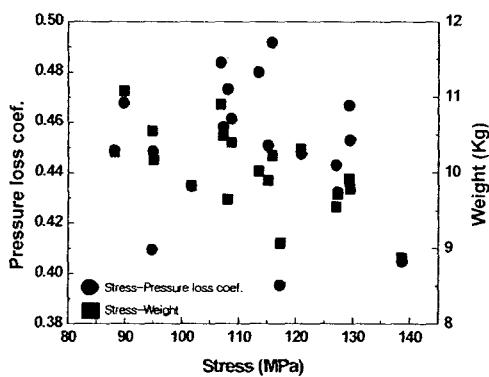


Fig. 8 Relation of stress and pressure loss coefficient, stress and weight

제에 대하여 복적합수와 제한조건의 변화정도를 표현할 수 있는 본 연구에서 제안하는 특성함수를 필요로 하게된다. 이를 디스크의 최적설계 문제로 표시하면 식 (4)와 같다.

$$\Psi_{rw} = \frac{W_r}{W_0} + k_1 \cdot \sum_{j=1}^m \text{Max} \left[0, \frac{\sigma_j}{\sigma_{all}} - \varepsilon \right] + k_2 \cdot \sum_{j=1}^m \text{Max} \left[0, \frac{C_{rj}}{C_{r_{max}}} - \varepsilon \right] \quad (4)$$

여기서 W_r 는 직교배열표에 의해 해석한 중량이고 W_0 는 초기중량을 나타낸다. ε 는 각 별적항이 한차원 낮은 값을 만들기 위한 각각의 상수를 나타내고, k_1 , k_2 는 복적합수 및 별적합수의 가이드로 조절하는 별적계수이다. 별적합수에서 제한조건의 위배량은 직교배열의 조합에서 나온 값이며, 제한조건을 모두 만족시키는 경우 별적합수는 영의 값을 갖는다. 또한 C_{rj} 는 직교배열표에 의한 압력손실계수이고, $C_{r_{max}}$ 은 요구압력손실계수이다.

Table 3은 진절의 실험결과를 바탕으로 설계변수에 대한 수준을 대응시키 제한조건의 문제를 고려하기 위한 특성함수로써 나타낸 것이다. 각 실험에서 구해진 용력, 압력손실계수와 중량에 대하여 특성함수 식 (4)에 적용하였다. 그리고, 별적계수 k_1 과 k_2 는 설정된 제한 조건을 모두 만족한 경우도 있지만, 이러한 결과는 특성함수에서 복적합수의 영향을 무시하는 결과를 얻을 수 있기 때문에 원래 복적합수에 비해 별적항이 한차원 낮도록 값을 부여하였다.

각 실험에 대한 특성치의 결과를 각 설계변수의 수준수 중에서 가장 적합한 수준수를 결정하기 위해 각 설계변수의 효과 및 평균분석으로서 설계변수에

대한 수준수의 최적해를 평가해보았다.

Table 3 Characteristic function of the results

Exp	characteristic function
1	0.8872
2	0.9529
3	1.0303
4	0.9778
5	1.0488
6	0.9807
7	0.9884
8	1.0530
9	1.1098
10	0.9937
11	0.9054
12	0.9706
13	1.0291
14	0.9682
15	1.0151
16	1.0406
17	1.0954
18	1.0251

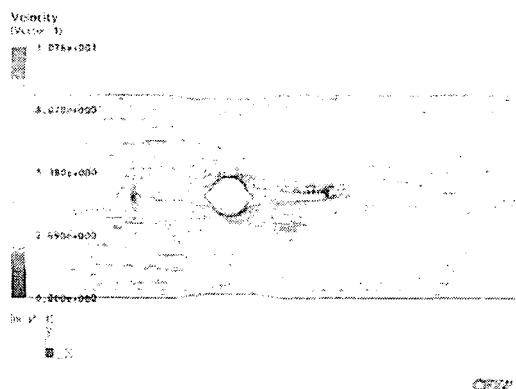
4.2 디스크 형상의 최적화

실험계획법에 의해 용력, 압력손실계수와 중량의 복적합수에 대한 영향을 미치는 설계변수를 알아보기 위해 측정데이터로부터 평균분석을 하였다. 그리고 특성치에 대한 최적수준은 각 인자의 수준별 평균값이 최소가 되는 각 설계변수의 조합으로 구하였다. 특성치에 대한 평균분석의 결과를 Table 4에 나타내었으며, 이는 각 설계변수의 수준에 따른 효과를 나타내고 있다. 예를 들어 A의 1수준효과는 실험 번호 1, 2, 3, 10, 11, 12에 해당되는 특성치의 전체평균으로부터 그 설계변수 수준에 의한 결과의 원차로 평가된다.

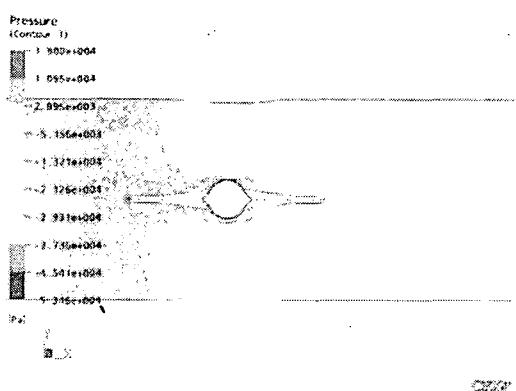
Table 4 Design variables affecting the characteristic function

Factor	Effect		
	1	2	3
A	0.9567	1.0033	1.0521
B	0.9861	1.0040	1.0219
C	0.9985	1.0025	1.0111
D	0.9592	1.0017	1.0512
F	1.0027	1.0046	1.0048
G	1.0042	1.0044	1.0035

Fig. 9는 각 설계변수에 대해서 수준수의 영향도를 나타낸 것으로서 각 설계변수의 원차를 파악할 수 있다. 평균분석 결과에서 기여율이 큰 설계변수



(a) Velocity distribution



(b) Pressure distribution

Fig. 10 Optimal fluid analysis result of characteristic function

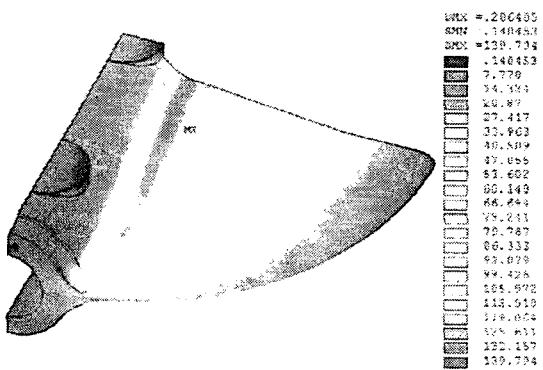
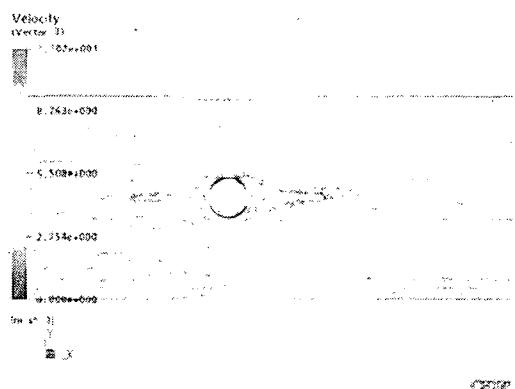
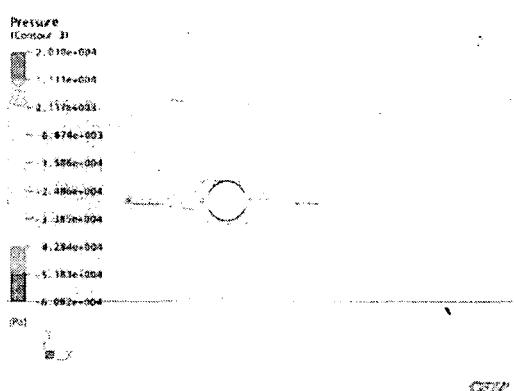


Fig. 11 Optimal structure analysis result of characteristic function



(a) Velocity distribution



(b) Pressure distribution

Fig. 12 Fluid analysis result of orthogonal array

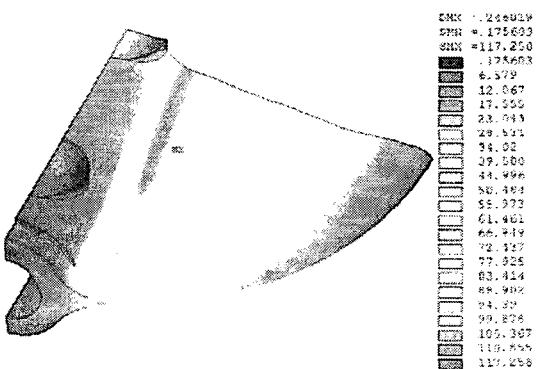


Fig. 13 Structure analysis result of orthogonal array

는 편차가 크게 나타나는 A와 D인을 알 수 있으며, 각 인자별 수준수의 효과를 비교하여 최적수준을 조합하면 A는 3수준, B는 3수준, C는 3수준, D는 3수준, E는 3수준, F는 2수준이다.

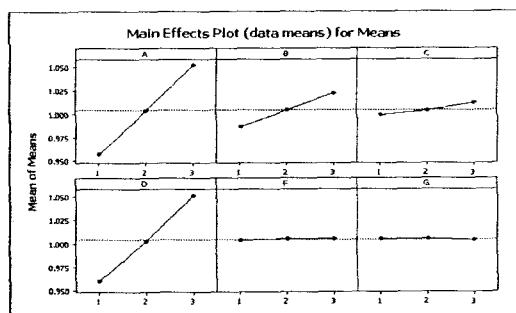


Fig. 9 Mean effect of each level for characteristic function

최적해의 조합으로서 앞서 해석된 풍밀 조건에서 구조해석과 유동해석을 실시하여 그 결과를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 12와 Fig. 13은 직교 배열표에서 용력과 압력순실계수의 기준치를 만족하면서 중량이 가장 가벼운 11번 실험의 해석결과를 나타내고 있다.

이상과 같이 초기형상, 평균분석 및 직교배열표에 의한 각각의 해석결과를 Table 5에 정리하였다. 초기형상의 경우 용력은 113.47 MPa이고 압력순실계수는 0.479730이며, 중량은 3.206 Kg이다. 평균분석에 의한 경우 용력은 139.79 MPa이고 압력순실계수는 0.404886이며, 중량은 2.836 Kg이다. 또한 직교 배열표에 의한 경우 용력은 117.26 MPa이며 압력순실계수는 0.395473이며, 중량의 경우 2.903 Kg이다. 이 결과를 비교해보면 초기형상은 용력의 경우 목표값인 136.67 MPa를 만족하지만, 압력순실계수가 목표값인 0.5를 초과하고 있으며, 특성함수에 의한 최적해는 압력순실계수의 경우 목표값을 만족하지만, 용력의 경우 목표값을 초과하였다. 이러한 결과는 L18의 직교배열표에서 11회의 실험이 제한조건을 위배하는 경우이고 이것의 영향이라 판단된다.

따라서 직교배열표의 조합에 의한 경우와 평균분석으로 구한 최적해를 비교하여 직교배열표의 조합에 의한 해가 더 우수하다면 그 결과를 최적해로 결정한다.(Yi, Park, Lee and Park, 2001) 이와 같은 경우에 용력은 두 경우에 모두 만족되는 결과를 얻었으므로 보다 작은 압력순실계수가 나온 직교배열표상에 나타나는 각 인자의 수준수를 최적해로 보는 것이 타당하다. 그러나 제한조건이 있는 문제일 경우 직교배열표만으로는 평가할 수 없는 한계점을 특성함수를 이용함으로써 설계변수의 민감도를 높이고자 하였으나 특성함수를 이용함에 있어 직교배열표상의

용력과 압력순실계수의 결과 중 제한조건을 만족하는 실험 수는 20 %미만이다. 이는 평균분석에서 각 수준수의 결정에 있어서 오차를 유발할 수 있다. 이러한 오차를 줄이기 위해서는 제한조건을 만족하는 실험횟수를 증가시켜 실험수의 제한조건을 만족하는 결과를 보다 높일 경우 더욱 좋은 최적해의 결과를 얻을 수 있다고 판단된다.

Table 5 Result of analysis

	Section of quadriected ball		
	Initial case	ANOM result	Orthogonal array result
Stress (MPa)	113.47	139.79	117.258
Press. of coef.	0.479730	0.404886	0.395473
Weight (Kg)	3.206	2.836	2.903

5. 결 론

본 연구에서는 비터플라이 밸브의 최적설계를 위하여 유동해석과 구조해석을 수행함으로써 밸브 특성을 평가하였다. 또한, 직교배열표와 특성함수를 이용하여 디스크의 최적설계를 수행함으로써 통계학적 방법(Stochastic method)의 유용함을 확인하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 최대용력과 압력순실계수 및 중량으로 직교배열표를 작성한 결과에 대한 목적함수와 설계변수 사이의 상관관계를 특성함수를 이용함으로써 두 가지 이상의 목적함수에 대해 설계변수의 변화에 따른 설계변경의 효과를 평가할 수 있었다.

(2) 디스크의 최적설계 결과 초기 모델에 비해 용력은 3.3% 증가하였고, 압력순실계수는 17.6% 감소하였으며, 중량은 9.5% 감소하였다.

(3) 특성함수에 의한 결과가 직교배열표의 결과보다 조금 높게 나타났다. 이는 제한조건을 위배하는 경우가 많은 결과로 판단된다.

(4) 최적설계를 실시한 결과 구조적 안전성을 유지하면서, 기준 압력순실계수를 만족하는 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Addy, A.J., Morris, J.C. and Dutton, J.C. (1985). "An Investigation of Compressible Flow Characteristics of Butterfly Valves", ASME J. Fluid Engineering, Vol 107, 512~517.
- Lacor, C. and Hirsch, C. (1988). "Numerical Simulation of the Three-Dimensional Flow around a Butterfly Valve", ASME Fluids Eng. Div. Publ. FED. Vol.69, Flows in Non-Rotating Turbomachinery Components.
- Kim, R. H. and Wu, N. Y. (1992). "Numerical Simulation of Butterfly Valve Fluid Flow", proceedings of the FLUENT User's Group Meeting, pp. 296~213.
- Fermer, M. and Svensson, H. (2001). "Industrial Experiences of FE-based Fatigue Life Predictions of Welded Automotive Structures", Fatigue Fract Eng. Mater Struct 23, pp. 489~500.
- Chen, W., Allen, J. K., Tsui, K. L. and Mistree, F. (1996). "A Concept Exploration Method for Determining Robust Top-Level Specifications", Engineering Optimization, Vol.26, pp. 137~158.
- Lee K. H. and Park G. J. (1998). "Robust Optimization in Discrete Design Space for Constrained Problems", Trans. of KSME A, Vol. 22, No. 5, pp. 1621-1626.
- A. Yada, T. sakurai and H. Takeda (1984). "The steady two-dimensional flow of viscous incompressible fluid past an elliptic valve if zero angle of attack placed in a rectilinear channel - As a model of a flow past a fully open butterfly valve", KUGD 84-1.
- M. Antoku and T. Sakurai (1984). "Numerical solution of two-dimensional channel flow of viscous incompressible fluid past an elliptic cylinder", KUGD 86-4, 1986 and Eng., Vol.37, pp. 217~286.
- T. Kimura et al. (1995). "Hydrodynamic characteristics of a butterfly valve-Prediction of pressure loss characteristics", ISA Transaction 34, pp. 319-326.
- Kim, R. H. and Huang, C. (1993). "3-D Analysis of Butterfly Valve Fluid Flow", Proceedings of the FLUENT User's Group Meeting, pp. 43~57.
- Yi J. W., Park J. S., Lee K. H. and Park K. J. (2001). "Development of an Optimization Algorithm Using Orthogonal Arrays in Discrete Design Space", Trans. of KSME A, Vol. 25, No. 10, pp. 1621~1626