

특성함수를 이용한 분할 볼 밸브의 최적설계에 관한 연구

최종섭*, 박영철#

A Study on the Optimization of a Devided Ball Valve using Characteristic Function

Jong Sub Choi*, Young Chul Park#

ABSTRACT

In modern industrial society, many kinds of valves have been used to control fluid flow. For the optimization of a ball valve, a quarter of spherical ball was modeled and evaluated. However, there is a difficulty in the application of the optimization technique because of the complexity of the fluid and the restriction of analysis.

Therefore, in this study, it is performed to evaluate the stability of an initial model using FEM(Finite Element Method) and CFD. In addition, a shape optimization design of the valve is accomplished using an orthogonal arrangement and characteristic functions. From the result, a new design method is represented that could overcome the time and space restriction in structural design, such as the divided ball valve with less experiment.

Key Words : Characteristic function(특성함수), Analysis of means(평균분석), Optimization(최적설계), Orthogonal array(직교배열표)

1. 서론

현대 산업에서 효과적인 유량제어를 위해 많은 종류의 밸브들이 사용되고 있다. 그 중에서 볼 밸브는 배관의 직경과 밸브에서 유체가 통과하는 직경이 같아 압력 손실이 거의 발생하지 않는 장점이 있으나 구조적으로 바디가 볼을 감싸고 있기 때문에 대형화 될수록 크기나 중량이 비례 급수적으로 증가하는 단점이 있다. 반면에 버터플라이 밸브는 원관 내부에 설치된 원형 디스크를 회전시킴으로써 유량을 조절하기 때문에 바디의 폭이 좁고, 중량이

가벼우며 배관내에서 공간을 작게 차지하는 이점이 있다. 그러나 볼 밸브에 비하여 기밀 유지 능력이 현저히 저하될 뿐만 아니라 디스크 구조상 좌우 대칭 상태로 힘을 받기 때문에 높은 차압을 요구하는 계통에는 진동 및 소음 등을 유발하므로 배관에 적용하기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 기존 볼 밸브의 뛰어난 기밀 유지의 장점을 가지면서 구조를 간략화시켜 중량을 대폭 감소시키는 새로운 형태의 볼 밸브의 개발을 목적으로 한다.

새로운 형태의 볼 밸브 제작을 위해서는 밸브의

* 접수일: 2004년 7월 27일; 게재승인일: 2006년 6월 29일

* 동아대학교 기계공학과 대학원

교신저자: 동아대학교 기계공학과

E-mail parkyc67@mail.donga.ac.kr Tel. (051) 200-7652

유동 특성과 구조적 안정성이 확보되어야 한다. Addy 등¹은 밸브 주위의 유동을 1차원의 돌연확대부로 가정하는 이론적 모델을 제시하여 이를 실험결과와 비교하였고, Lacor와 Hirsh²는 버터플라이 밸브의 디스크 주위에서 Euler 수치 해석코드를 이용하여 수치해석을 행하였으며, Kim과 Wu³는 버터플라이 밸브의 비압축성 유동의 유동형태, 속도분포와 배출계수의 평가를 위한 2차원 수치해석을 수행하였다.

이렇게 밸브의 유동 특성만을 고려한 연구는 많이 수행되어왔지만 아직까지 유체의 유동 특성을 고려한 밸브의 최적설계에 대한 연구는 많이 수행되지 않는 실정이다. 그것은 밸브의 설계에 있어서 유동해석의 어려움과 해석적인 한계로 인하여 민감도에 기반한 기존의 최적설계 기법의 적용에 어려움이 따르고, 밸브의 개폐 정도에 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 따르기 때문이다.

최근에는 통계학적 방법을 이용한 실험계획법과 연계한 최적설계의 개념이 도입되고 있는 추세이다⁴. 이는 시스템의 부정확성(inaccuracy)을 체계적으로 문제의 내부에 반영하여 모형에 포함시키고, 불확실성을 동시에 추론하는 방법으로 부각되고 있다. Chen 등⁵은 반응표면법과 확장된 분산분석(analysis of variance)을 이용하여 구조해석과 실험계획법을 조합하는 다목적 문제에 적합한 설계지원시스템을 개발한 바 있고, Baek 등⁶은 실험계획법과 수리적방법을 이용하여 목적함수에 대한 설계변수의 상관관계를 분산분석으로 파악한 뒤 설계변수의 변화에 따른 평가특성치를 표현할 수 있는 추정식을 이용하여 최적설계를 수행하였다.

본 연구에서 개발된 새로운 형태의 밸브의 유동 특성과 구조적 안정성을 확보하기 위하여 구조해석과 유동해석을 수행함으로써 밸브의 특성을 평가하고, 실험계획법(design of experiments)의 일종인 직교배열표(orthogonal array)를 이용하여 볼의 최적설계를 수행하였다. 그러나 직교배열표를 이용한 최적설계에서는 제한조건함수를 고려할 수 없으므로 특성함수(characteristic function)⁷를 도입하였다. 이 특성함수는 압력손실계수와 응력을 동시에 고려한 것이고, 이 특성치를 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 한다. 그러나 직교배열표에 의한 행렬실험으로부터 얻어지는 목적함수의 결과치는 최적설계에 취급되는 제한조건을 포함하지 않고 있다. 따라서 응력과 같은 하나의 목적함수의 사항만으로는 최적설계 문제에 있어서 결과를 평가할 수 없다. 이를 볼의 최적설계문제로 정식화시키면 식(1)과 같이 된다.

Minimize σ

$$\text{Subject to } C_v \leq C_{v_m} \quad (1)$$

여기서 σ 는 구조물에 발생하는 최대 응력을, C_v 는 직교배열표의 실험에서 얻어지는 압력손실계수의 특성치이고, C_{v_m} 는 압력손실계수에 대한 한계를 나타낸다. 특성함수는 직교배열표의 각 실험에서 제한조건의 가용성(feasibility)이 포함될 수 있도록 한다.

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

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

여기서 g_j 는 제한조건함수를 나타내고, k 는 벌칙계수를, N_{ieq} 는 부등식조건의 개수를 나타낸다. 벌칙계수 k 는 목적함수 및 벌칙함수의 기여도를 조절하는 역할을 한다. 위 식에서 제한조건을 만족시킬 경우에는 벌칙함수는 영의 값을 갖게 되고 제한조건을 위배할 경우에는 위배량인 $k \times g_j$ 의 값을 갖게 된다. 벌칙계수에 따라 설정된 제한조건을 모두 만족 하는 경우도 있지만 이러한 결과는 특성함수에서 목적함수의 영향을 무시하는 결과를 얻을 수 있기 때문에 원래 목적함수에 비해 벌칙항이 한차원 낮도록 값을 부여하였다. 이로써 특성함수 Ψ_{new}

는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\psi_{new} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + k \cdot \sum_{j=1}^{N_{req}} \text{Max} \left[0, \frac{C_{v_j}}{C_{v_{opt}}} - 1 \right] \quad (3)$$

여기서 σ_0 는 초기 응력을 나타낸다.

2.2 최적설계방법

특성함수를 이용하여 최적설계를 수행하기 위하여 초기의 볼을 절단하여 주요 부위에 변수를 주어 유동해석과 구조해석을 수행한 후, 직교배열표를 선택하여 설계변수와 각 설계변수의 수준수가 결정되면 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 최적해의 결과를 얻을 수 있다. Fig. 1은 제시된 과정을 순서도로 나타내었다.

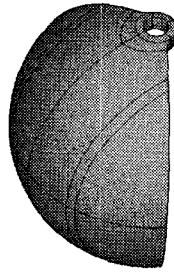


Fig. 2 Section of quadsiectioned ball

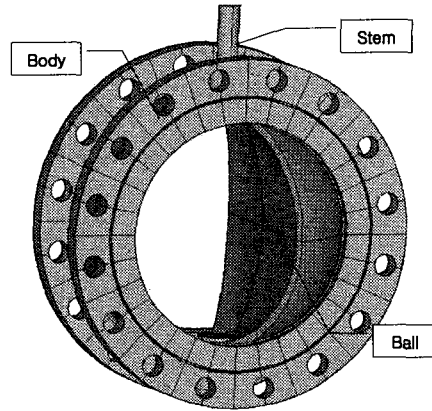


Fig. 3 Ball valve with section of quadsiectioned ball

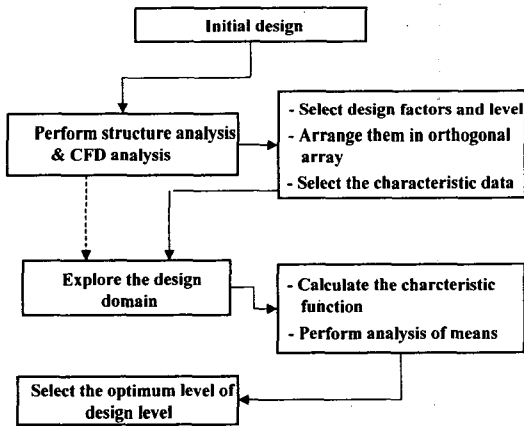


Fig. 1 Process of application design optimization

3. 구조해석 및 유동해석

3.1 해석모델

현재 개발하고자 하는 분할 볼의 구조는 Fig. 2에서와 같이 볼의 형태를 기존 볼 밸브의 구형 볼의 1/3크기인 호형으로 변경함으로써 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 밸브의 중량과 배관에서 밸브가 차지하는 공간을 획기적으로 감소시킬 뿐만 아니라 볼 밸브의 특성상 뛰어난 기밀유지능력을 가질 것이다.

본 연구에서는 항복 강도를 기준으로 안전율 1.5를 적용하여 205 MPa를 목표응력으로 하였으며 압력손실계수의 경우 많은 종류의 밸브에 대하여 유동해석을 수행한 결과를 바탕으로 하여 0.8을 목표 압력손실계수로 설정하고 설계를 하였다. 압력손실계수를 계산하기 위하여 열림각도가 90°인 경우의 유동해석결과를 이용하였다. Fig. 4는 해석시 필요한 구속 조건과 하중 조건을 나타내고 있다. 밸브는 스템에 의하여 제어되기 때문에 볼과 스템 연결부에 완전 구속을 주었다. 또한 유동 모델과 마찬가지로 XY평면에 대하여 대칭을 이루기 때문에 대칭면에 대칭면구속을 주었다.

하중조건은 볼과 유체가 접하는 부위에 밸브의 최대 규정 압력인 16kg/cm², 즉 1.57MPa를 적용하여 해석을 수행하였다. 그리고 볼의 재질은 ASTM A296 CF8M으로 Table 1에 재료의 물성값을 나타내고 있다.

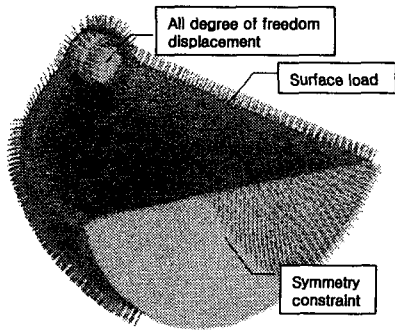


Fig. 4 Load and boundary condition for analysis

Table 1 Mechanical properties of ASTM A296 CF8M

Yield Stress (MPa)	Safety Factor (A Standard of Yield Stress)	Young's Modulus (Mpa)	Poisson's Ratio
308	1.5	193×10^3	0.27

3.2 유동해석

현재 개발하고자 하는 분할 볼의 초기 형상에 대한 유동 해석과 구조 해석을 수행하였다. 먼저, 유동 해석을 위한 내부 유체는 비점성·비압축성 유체인 상온(20℃)의 물을 사용하였으며 해석프로그램은 상용 CFD 소프트웨어인 STAR-CD를 이용하였다. 유동장은 Yada⁸와 Anotoku⁹의 수치해석과 Kimura¹⁰의 실험에서 알 수 있듯이 레이놀드수가 4000을 넘는 난류 거동을 하므로 벽함수(wall function)를 사용하는 High 레이놀드 k-ε 모델을 이용하여 계산하였다. 난류 관운동에 대한 마찰계수는 레이놀드수와 상대조도에 의존하나 해석에서는 실제로 설치될 밸브와 연결되는 모든 관에 대하여 고려할 수 없기 때문에 매끈한 관이라 가정하고 해석을 수행하였다. 그리고 Fig. 5에서는 해석을 수행하기 위한 여러 경계조건의 적용을 확인할 수 있다. 밸브 입구속도는 미국수도협회(AWWA)의 규정 최고속도인 16ft/s 즉, 4.8768m/s를 적용하였고, 출구는 대기압으로 설정하였다. 그리고, 유동모델은 XY 평면에 대하여 대칭을 이루고 있기 때문에 대칭면 구속을 주었다. 그리고 해석에서 밸브 하류유동의 패턴은 하류부분의 관의 길이가 증가함에 따라 변

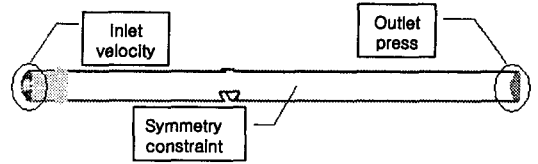


Fig. 5 Boundary conditions in fluid analysis

하므로 유동이 완전히 발달하는 10D의 거리¹¹를 적용하여 해석을 수행하였다.

3.3 구조해석

볼의 안전성을 평가하기 위하여 유한요소 상용 소프트웨어인 ANSYS 7.1을 이용하여 강도 평가를 수행하였다. Fig. 6은 유한요소모델을 나타내며, 3차원 10절점 요소를 이용하여 구조 해석을 수행하였다. 이 때, 사용되어진 절점수는 180,780개이고, 요소수는 120,528개이다.

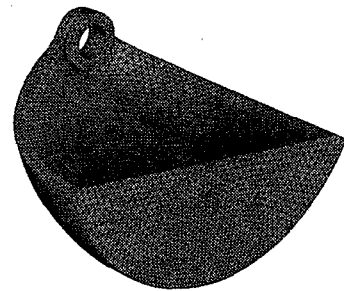
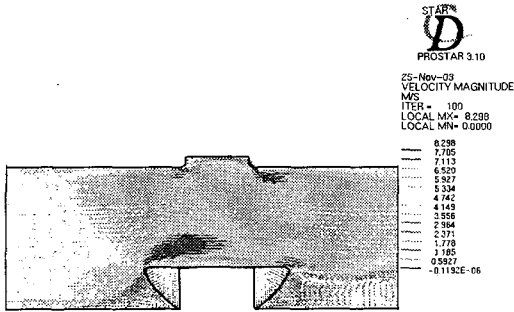


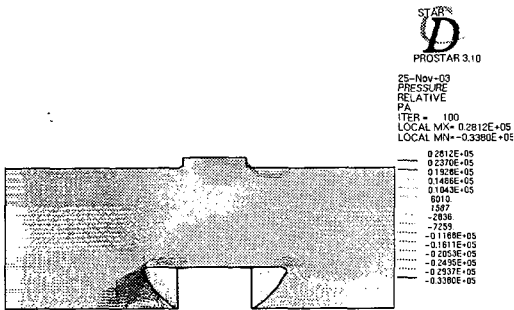
Fig. 6 Element shape of ball

3.4 초기 모델의 해석 결과

유동 해석을 수행한 결과를 Fig. 7에 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 볼에 의하여 유체가 흘러가는 관로가 좁아졌다가 다시 넓어짐에 따라 관로가 좁아지는 부위에서 속도가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 볼의 영향으로 인하여 볼의 좌측과 우측면에서 압력 손실이 발생한 것을 알 수 있다. Fig. 8에서는 초기 형상의 볼의 구조 해석 결과를 나타내었다. 해석 결과에서 알 수 있듯이 볼의 구조적 취약점인 스템과의 연결부에서 응력이 집중되는 것을 알 수 있다. 이 때의 최대 응력은 124.683 MPa이다.



(a) Velocity distribution



(b) Pressure distribution

Fig. 7 The result of fluid analysis

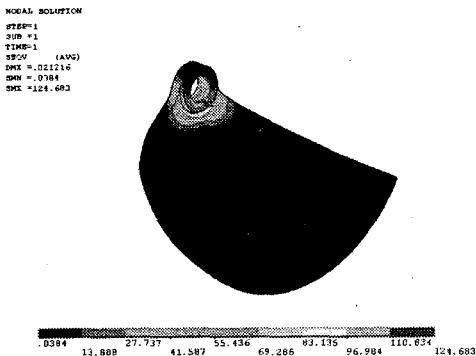


Fig. 8 The result of structure analysis

3.5 특성함수를 이용한 분할 볼의 최적설계

3.5.1 설계변수 및 수준수

기존에 사용되어진 볼은 앞서 해석한 결과에서 알 수 있듯이 기존 항복강도를 만족하지만 압력손실계수가 0.992363으로 목표 압력손실계수보다 높게 나타났다. 그래서 Fig. 9에서와 같이 유체의 흐름에 영향을 미치는 볼의 각 부위에 설계변수를 선정하였다. C의 경우 볼을 절단하기 위한 각도를 나타내며, D₁과 D₂는 유체의 흐름을 원활히 하기 위하여 내부의 형태를 변경하기 위한 변수이며, T는 볼의 옆면 두께를 나타내며, R은 볼과 스템의 연결부의 라운드를 나타낸다. 그리고 설계변수의 정확한 설계해를 구할 수 있도록 하기 위하여 설계구간에 대한 수준수를 Table 2에 나타내고 있다. 직교배열표는 L₁₈(2¹×3⁷)의 혼합직교배열표를 선택하였다. 이것은 선행연구 결과인 참고문헌¹²을 고려하여 선택되었으며 이 직교배열표는 1열과 2열의 교호작용은 다른 열의 희생없이 구할 수 있으며, 1~2열의 2원표를 작성하여 구하여야 한다. 3~8열의 임의의 두 열의 교호작용은 나머지 3개열에 고루 나누어져 있다. 따라서 이 직교배열표는 교호작용을 배치하지 않고 2수준의 인자 1개, 3수준의 인자 7개 이하로 배치할 때 사용할 수 있다.

설계변수의 배치는 2열에서 5열까지 배치하였으며, 나머지 열은 오차항으로써 배치하였다.

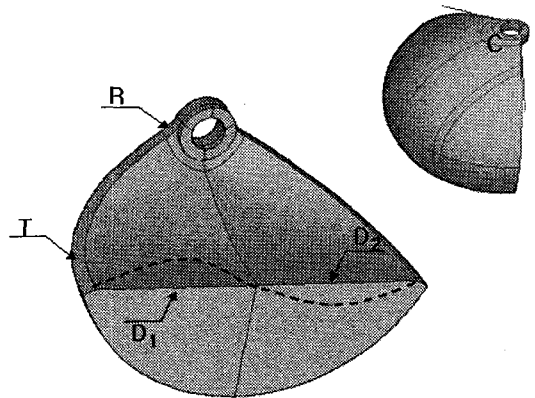


Fig. 9 Design factor

Table 2 Design factor and level

D. F.	C	D ₁	D ₂	T	R
Level	(°)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	123	-300	-300	155	20
2	125	0	0	158	25
3	127	300	300	161	30

3.5.2 직교배열표에 의한 구조 및 유동해석

Table 3은 혼합직교배열표를 이용한 구조해석 결과를 나타낸 것으로 설계변수의 각 수준수의 배치에 따른 압력손실계수와 응력을 나타내고 있다.

실험에 의한 직교배열표의 해석결과는 응력에서는 모두 목표응력을 만족하고 있지만, 압력손실계수의 경우 4, 8, 16번째의 실험이외에는 목표압력손실계수 이상의 값이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 10은 응력과 압력손실계수의 관계를 그래프로 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 압력손실계수가 0.9와 1사이일 때 비교적 높은 응력이 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 결과만으로는 직교배열표는 두 가지 이상의 목적함수에 대한 제한조건을 평가할 수 없다. 직교배열표상의 응력과 압력손실계수의 관계에서 응력의 기준치를 만족시키면서 압력손실계수가 가장 낮은 것은 8번째의 실험이라고 볼 수 있다. 하지만 이것은 정량적인 평가가 되지 않는다. 본 연구에서는 응력과 압력손실계수, 두 가지의 목적함수를 만족시키는 최적의 해를 찾기 위해 특성함수를 도입하였다.

3.5.3 특성함수의 계산

제한조건이 있는 문제에서의 직교배열표의 사용은 제한조건이 없는 문제와 동일하게 직교배열표에 의한 해석법이 사용되지만 제한조건이 유용성이 포함될 수 있도록 평가추정식의 작성이 요구된다. 따라서 설계문제에 대하여 목적함수와 제약조건의 변화정도를 표현할 수 있도록 본 연구에서 제안하는 특성함수를 필요로 하게된다.

Table 4는 전절의 응력과 압력손실계수에 대한 실험결과를 바탕으로 설계변수에 대한 수준을 대응시켜 제한조건의 문제를 고려하기 위한 특성함수의 값으로써 각 실험에서 구해진 응력과 압력손실계수에 대하여 특성함수 식 (3)에 적용하였다. 그리고, 벌칙계수 k 는 설정된 제한 조건을 모두 만족할 경

Table 3 Analysis result according to orthogonal array $L_{18}(2^1 \times 3^7)$

Exp	e ₁	C	D ₁	D ₂	T	R	e ₂	e ₃	Stress (MPa)	Pressure loss coef.
1	1	1	1	1	1	1	1	1	77.488	1.074988
2	1	1	2	2	2	2	2	2	129.282	0.97703
3	1	1	3	3	3	3	3	3	114.305	0.946354
4	1	2	1	1	2	2	3	3	109.92	0.755266
5	1	2	2	2	3	3	1	1	146.391	0.950339
6	1	2	3	3	1	1	2	2	97.968	0.854807
7	1	3	1	2	1	3	2	3	90.084	0.840325
8	1	3	2	3	2	1	3	1	110.475	0.707209
9	1	3	3	1	3	2	1	2	150.189	0.869074
10	2	1	1	3	3	2	2	1	154.272	0.974207
11	2	1	2	1	1	3	3	2	88.997	1.122404
12	2	1	3	2	2	1	1	3	109.623	0.94586
13	2	2	1	2	3	1	3	2	142.948	0.953229
14	2	2	2	3	1	2	1	3	89.003	0.903168
15	2	2	3	1	2	3	2	1	110.519	0.953254
16	2	3	1	3	2	3	1	2	110.169	0.795798
17	2	3	2	1	3	1	2	3	152.832	0.940833
18	2	3	3	2	1	2	3	1	89.966	0.812229

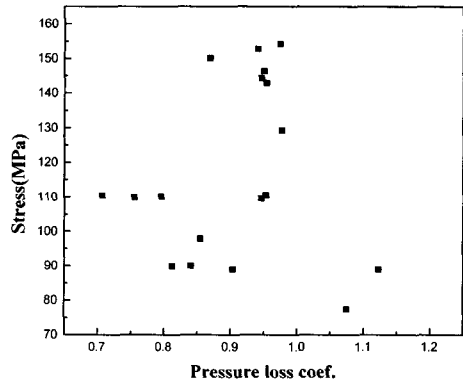


Fig. 10 Relation of stress and weight

우도 있지만, 이러한 결과는 특성함수에서 목적함수의 영향을 무시하는 결과를 얻을 수 있기 때문에 원래 목적함수에 비해 벌칙항이 한차원 낮도록 값을 부여하였다. 특성함수에서 압력손실계수를 기준으로 하여 허용압력손실계수 이상의 값을 포함한 것을 예로 들어 보면, 첫 번째 실험의 압력손실계

Table 4 Characteristic function of the Results

Experiment	Characteristic function
1	0.656
2	1.059
3	1.176
4	0.882
5	1.193
6	0.793
7	0.728
8	0.886
9	1.213
10	1.259
11	0.754
12	0.897
13	1.166
14	0.727
15	0.906
16	0.884
17	1.243
18	0.723

수는 1.074988로 이는 압력손실계수의 기준치인 0.8을 넘어서고 있다. 따라서, 기준을 넘어서는 양인 0.343735에 벌칙계수 k 를 곱하여 증량에 포함시키면 특성치는 0.656이 된다. 반대의 경우로 네 번째 실험에서의 압력손실계수는 0.755266으로 압력손실계수 기준치를 만족시키므로 벌칙함수의 값은 영이 되며, 특성치는 0.882가 된다. 각 실험에 대한 특성치의 결과를 각 설계변수의 수준수 중에서 가장 적합한 수준수를 결정하기 위해 각 설계변수의 효과 및 평균분석으로서 설계변수에 대한 수준수의 최적해를 평가해보았다.

3.6 볼 형상의 최적화

실험계획법에 의해 응력과 압력손실계수의 목적함수에 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 5에 나타내었으며, 이는 각 설계변수의 수준에 따른 효과를 나타내고 있다. 예를 들어 설계변수 C의 1수준효과는 실험번호 1, 2, 3, 10, 11, 12에 해당되는 특성치의 전체평균으로부터 그 설계변수 수준에 의한 결과의 편차로 평가된다.¹²

Table 5 Factors affecting the characteristic function

Factor	Effect		
	1	2	3
C	0.967	0.945	0.946
D ₁	0.929	0.977	0.951
D ₂	0.929	0.961	0.954
T	0.73	0.919	1.208
R	0.94	0.977	0.94

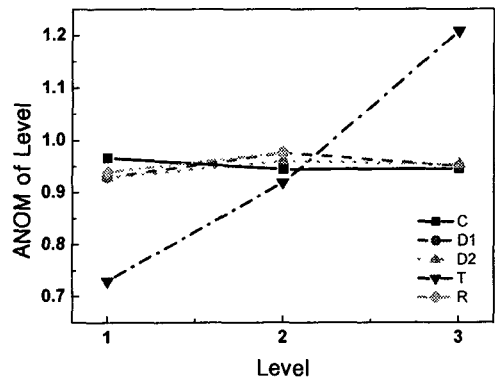
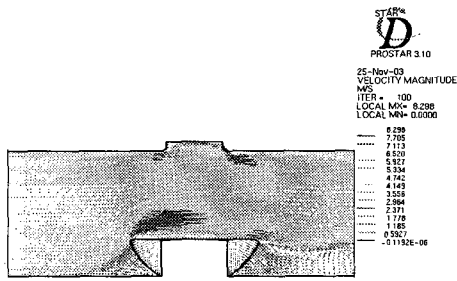


Fig. 11 Illustration of factor effect for characteristic function

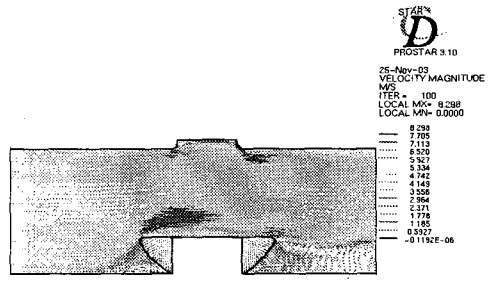
Fig. 11은 각 설계변수에 대해서 수준수의 영향도를 나타낸 것으로서 각 설계변수의 편차를 파악할 수 있다. 평균분석 결과에서 기여율이 큰 설계변수는 편차가 크게 나타나는 D₁과 T임을 알 수 있으며, 각 인자별 수준수의 효과를 비교하여 최적수준을 조합하면 C(2수준), D₁(1수준), D₂(1수준), T(1수준), R(3수준)가 된다.

최적해의 조합으로서 앞서 해석된 동일 조건하에서 구조해석과 유동해석을 실시하여 그 결과를 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 14와 Fig. 15는 직교배열표에서 응력의 기준치를 만족하면서 압력손실계수가 가장 낮은 경우의 해석결과를 나타내고 있다.

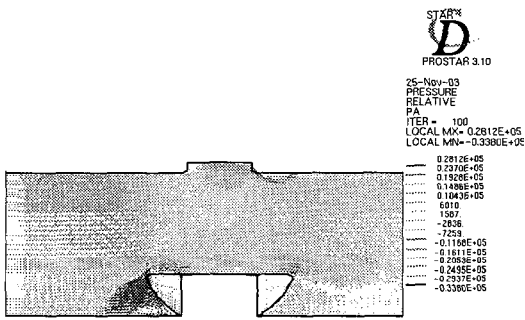
이상과 같이 초기형상, 평균분석 및 직교배열표에 의한 각각의 해석결과를 Table 6에 정리하였다. 초기형상의 경우 최대응력은 124.683 MPa이고 압력손실계수는 0.992363이다. 평균분석에 의한 경우



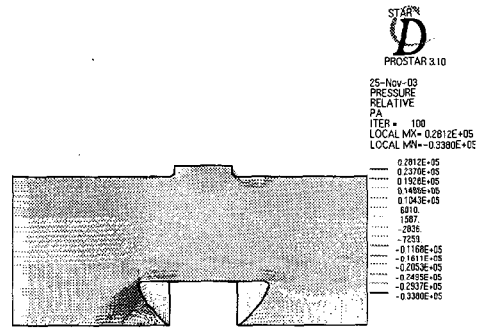
(a) Velocity distribution



(a) Velocity distribution



(b) Pressure distribution



(b) Pressure distribution

Fig. 12 Optimal fluid analysis result of characteristic function

Fig. 14 Fluid analysis result of orthogonal array

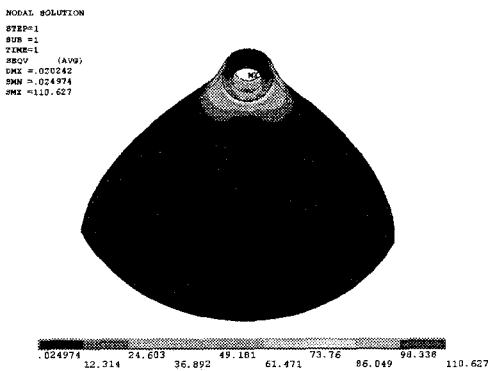


Fig. 13 Optimal structure analysis result of characteristic function

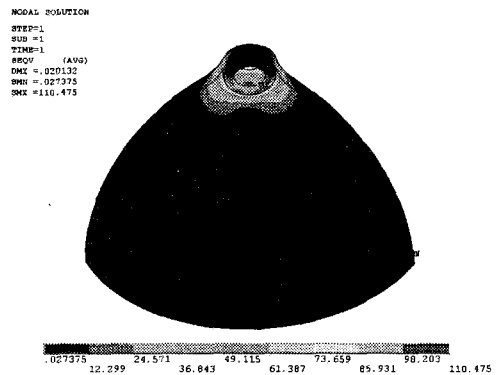


Fig. 15 Structure analysis result of orthogonal array

Table 6 Result of analysis

	Section of quadrisected ball		
	Initial case	ANOM result	Orthogonal array result
Maximum Stress (MPa)	124.683	110.627	110.475
Coefficient of Press	0.992363	0.823476	0.707209

최대응력은 110.627 MPa이고 압력손실계수는 0.823476이다. 또한 직교배열표에 의한 경우 최대응력은 110.475 MPa이며 압력손실계수는 0.707209이다. 이 결과를 비교해보면 초기형상은 압력손실계수가 목표값인 0.8을 초과하고 있으며, 특성함수에 의한 최적해는 직교배열표상에 존재하는 경우의 최적값보다 응력과 압력손실계수 둘 다 높게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 L_{18} 의 직교배열표에서 11회의 실험이 제한조건을 위배하기 때문에 이것의 영향이라 판단된다.

따라서 직교배열표의 조합에 의한 경우와 평균분석으로 구한 최적해를 비교하여 직교배열표의 조합에 의한 해가 더 우수하다면 그 결과를 최적해로 결정한다.¹³ 이와 같은 경우에 응력은 두 경우에 모두 만족되는 결과를 얻었으므로 보다 작은 압력손실계수가 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 압력손실계수의 결과중 제한조건을 만족하는 실험수는 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.

4. 결 론

본 연구에서는 밸브의 최적설계를 위하여 유동해석과 구조해석을 수행함으로써 밸브의 특성을 평

가하고, 직교배열표와 특성함수를 이용하여 볼의 최적설계를 수행함으로써 통계학적 방법(Stochastic method)의 유용함을 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 평균응력과 밸브의 성능을 나타내는 압력손실계수로 직교배열표를 작성한 결과에 대한 목적함수와 설계변수 사이의 상관관계를 특성함수를 이용함으로써 두 가지 이상의 목적함수에 대해 설계변수의 변화에 따른 설계 변경의 효과를 평가할 수 있었다.

2. 볼의 최적설계 결과 초기 모델에 비해 응력은 11.2% 감소하였고, 압력손실계수 역시 28.7% 감소하였다.

3. 특성함수에 의한 결과가 직교배열표의 결과보다 응력과 압력손실계수의 결과는 조금 높게 나타났다. 이는 제한조건을 위배하는 경우가 많은 결과로 판단된다.

4. 볼의 형상을 최적화시키기 위하여 구형의 볼을 1/3로 절단하여, 최적설계를 실시한 결과 구조적 안전성을 유지하면서, 기준 압력손실계수를 만족하는 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음

참고문헌

1. Addy, A.L., Morris, J.C. and Dutton, J.C., "An Investigation of Compressible Flow Characteristics of Butterfly Valves," ASME J. Fluid Engineering, Vol. 107, pp.512-517, 1985.
2. Lacor, C. and 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.
3. Kim, R. H. and Wu, N. Y., "Numerical Simulation Butterfly Valve Fluid Flow," proceedings of the FLUENT User's Group Meeting, pp. 296-213,

- 1992.
4. Fermer, M., Svensson, H., "Industrial Experiences of FE-based Fatigue Life Predictions of Welded Automotive Structures," *Fatigue Fract Eng. Mater Struct* 23, pp. 489-500, 2001.
5. Chen, W., Allen, J. K., Tsui, K. L and Mistree, F., "A Concept Exploration Method for Determining Robust Top-Level Specifications," *Engineering Optimization*, Vol.26, pp. 137-158, 1996.
6. Baek, S. H., Lee, D. W., Lee, K. Y., Cho, S. S. and 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.
7. Lee, K. H. and Park, G. J, " Robust Optimization in Discrete Design Space for Constrained Problems," *Trans. of KSME A*, Vol. 22, No. 5, pp. 1621-1626, 1998.
8. Yada, A., Sakurai, T. and Takeda, H., "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, 1984.
9. Antoku, M. and Sakurai, T., "Numerical solution of two-dimensiona channel flow of viscous incompressible fluid past an elliptic cylinder," *KUGD* 86-4, 1986 and *Eng.*, Vol.37, pp. 217-286, 1984.
10. kimura, T., et al., "Hydrodynamic characteristics of a butterfly valve-Prediction of pressure loss characteristics," *ISA Transacion* 34, pp. 319-326, 1995.
11. Kim, R. H. and Huang, C., "3-D Analysis Butterfly Valve Fluid Flow," *Proceedings of the FLUENT User's Group Meeting*, pp.43-57, 1993.
12. Phadke, M. S., "Quality Engineering Using Robust Design," Prentice Hall, 1989.
13. Yi, J. W., Park, J. S., Lee, K. H. and Park, K. J., "Development of an Optimization Algorithm Using Orthogonal Arrays in Discrete Design Space," *Trans. of KSME A*, Vol. 25, No. 10, pp. 1621-1626, 2001.