

CAE에 기반한 DACE 모델을 이용한 버터플라이밸브 디스크의 최적설계

박영철* · 강정호* · 이종문** · 강진**

*동아대학교 기계공학과

**동아대학교 대학원 기계공학과

Optimization of Butterfly Valve's Disc Using the DACE Model Based on CAE

YOUNG-CHUL PARK*, JUNG-HO KANG*, JONG-MOON LEE** AND JIN KANG**

*Dept. of Mechanical Engineering Graduate School, Dong-A University, Busan, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Graduate School, Busan, Korea

KEY WORDS: DACE (Design and analysis of computer experiments) 전산실험계획, Optimization 최적설계, Butterfly valve 버터플라이밸브, Orthogonal array 직교배열표, Kriging method 크리깅 방법

ABSTRACT: The butterfly valve has been used to control the switch and flux of fluid. While research about the characteristics of butterfly valve fluid have been done, study of the optimum design, considering structural safety, must keep pace with it. Thus, a method is proposed for an optimum butterfly valve. Initially, the stability of the butterfly valve, using FEM and CFD, is evaluated, and a variable is selected using the initial analysis results. Also, the shape optimization design is accomplished using the DACE model. In terms of research results, the experiment satisfied the objective and limitation functions.

1. 서 론

제조공정, 발전설비 등의 산업용 및 선박용으로 많이 사용되고 있는 버터플라이밸브는, 가스, 액체 등의 유체의 큰 흐름을 포함하는 개폐와 유량을 조절하는 목적으로 사용된다. 이러한 버터플라이밸브는 원관 내부에 설치된 원형 디스크를 회전시킴으로써 유량을 조절하는 구조로써, 볼밸브, 글로브밸브, 게이트밸브 등의 타밸브에 비하여 중량이 가볍고 공간을 작게 차지하며 완전 개폐 작동이 매우 빠르다는 장점이 있어 모든 산업 현장에 걸쳐 가장 많이 사용되고 있다. 또한, 최근에는 밸브 소재의 발달에 따라 초저온 천연가스의 유량조절에서부터 핵처리장치 퍼지밸브등의 특수용도에 이르기까지 폭넓게 사용되고 있다. 이러한 고온, 고압의 환경조건에서 사용되기 위해서는 기능성과 신뢰성 및 안전성이 모두 보장되어야하는 중요성을 가지므로 밸브의 설계 및 제조에는 고도의 기술이 요구된다.

지금까지 버터플라이밸브에 대한 연구들은 주로 압력손실계수, 토크특성, 유량제어 특성 등의 유동특성만을 고려한 수치해석적 연구와 PIV(Particle image velocimetry) 기법에 의한 실험적 연구 등이었다. Addy et al. (1985)은 압축성 유동의 제어에 사용되는 버터플라이 밸브의 성능에 대하여 연구하였고, Eom

(1988)은 구멍이 뚫린 회전관을 갖는 버터플라이밸브의 성능과 밸브 디스크의 직경이 밸브의 유량제어 특성에 미치는 영향을 연구하였다. Park and Lee (2000)는 디스크 회전각에 따른 공기 조화용 버터플라이 밸브의 유동제어 특성과 밸브 하류에서의 3차원 유동의 가시화 연구를 수행하고 하류 유동을 안정화하기 위한 유동 안정장치를 제작하여 하류 난류 유동의 변화에 대해 연구하였으며, Lacor and Hirsh (1998)는 버터플라이밸브의 디스크 주위에서 Euler 수치 해석코드를 이용하여 수치해석을 행하였다. 또한, Kimura et al. (1995), Ogawa and Kimura (1995) 등에 의하여 버터플라이밸브 디스크의 형상에 따른 유체 동역학적 특성 중에 압력손실 특성 및 토크 특성의 예측을 위한 연구가 수행되었다. 이와 같이 밸브의 주요 사항인 유동특성 및 구조적 안전성 중, 밸브의 유동 특성만을 고려한 연구는 많이 수행되어왔으나, 이와 함께 구조적 안전성을 고려한 연구는 활발히 수행되지 않았다. 이는 밸브의 설계에 있어서 유동해석의 어려움과 해석적인 한계로 인하여 민감도에 기반한 기존의 최적설계 기법의 적용에 어려움이 따르고, 밸브의 개폐 정도에 따라 유체에 의한 압력이 다르게 작용하기 때문이다. 또한, 밸브 구조물의 안정성만을 고려하는 것이 아니라 밸브의 전개시 유체의 흐름을 원활하게 하도록 고려하는 설계를 해야하므로 상당한 어려움이 따르고 있다. Park et al. (2005)은 버터플라이밸브의 유동특성을 고려하여 특성함수의 개념을 도입하여 최적설계를 수행하였으나, 이는 직교배열표에 의하여 정해진 설계변수들의 수

교신저자 박영철 : 부산시 사하구 하단동 840번지

051-200-7652 parkyc67@dau.ac.kr

준수를 최적 조합으로 맞추기만 할뿐, 정확한 최적해의 도출은 불가능하였다. 따라서, 본 논문에서는 설계변수가 많거나 비선형성을 띠는 문제에 적합하며 실제 성능 함수값을 정확히 예측할 수 있는 근사모델을 크리깅(Kriging) 방법으로 알려진 DACE (Design and analysis of computer experiments, 전산실험계획)를 이용하여 구성함으로써 버터플라이밸브의 최적설계를 수행하였다. DACE 모델은 직교배열표로는 고려할 수 없는 제한조건 함수를 고려할 뿐만 아니라, 유동특성인 압력손실계수와 구조적 특성인 응력을 동시에 고려할 수 있다. 이를 통하여 정량적인 최적해를 도출하였을 뿐만 아니라, 도출된 최적해를 적용한 모델의 해석으로 최적 기법 적용 결과를 검토함으로써 최적 기법의 신뢰성을 평가하였다.

2. DACE 모델

2.1 크리깅

크리깅(Kriging)은 관심 있는 지점에서 특성치를 알기 위해 이미 값을 알고 있는 주위의 값들의 가중 선형조합으로 그 값을 예측하는 지구통계적 기법이다. Danny Krige가 이 기법을 광산에 적용하여, 이미 알려진 광맥의 공간적 정보를 이용하여 새로운 광맥을 찾기 위해 사용하면서 그의 이름을 따라 크리깅 기법이라 부르게 되었다. 그 후에 Sacks et al. (1989)에 의하여 크리깅 기법이 공학 분야에 적용되어 사용되면서, 기존의 크리깅 모델을 전산실험에 적합하도록 통계적, 수학적으로 정립하여 새로운 형태의 크리깅 모델을 제시하였는데, 이것이 바로 현재 최적설계 분야에서 사용되고 있는 크리깅 메타모델 즉, DACE 모델 (Guinta and Watson, 1998; Martin and Simpson, 2002; Ryu et al., 2002; Lee, 2005)이다.

크리깅에서 사용되는 가중치는 대개 예측 오차를 최소로 하면서 그 추정식이 편향되지 않도록 결정되는데, 이를 위해 공간적 상호관계를 나타내는 베리오그램이 사용되며 분리거리에 따라 공분산을 계산한다. 이를 간단한 수식으로 나타내면 아래의 식 (1)과 같다.

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (1)$$

여기서 z^* 는 위치가 알려진 지점에서 크리깅을 이용한 예측치가 되며, z_i 는 이미 그 위치와 값을 알고있는 주위의 점이고, λ_i 는 사용된 주위의 각 자료의 가중치이며 n 은 크리깅 예측을 위해 사용한 자료의 총 개수이다.

2.2 DACE 모델

본 논문에서는 성능함수의 근사함수를 구성하기 위하여 크리깅 기법으로 알려진 DACE 모델을 이용하였다. DACE 모델에서는 전역적 근사화 모델이 다음과 같이 구성된다.

$$y(x) = g(x) + Z(x) \quad (2)$$

여기서 x 는 설계변수 b 와 설계 변수 p 의 모든 성분을 가질 수 있는 벡터이다. 그리고, $g(x)$ 는 알고 있는 함수이며, $Z(x)$ 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르는 확률변수이다. 이때 $g(x)$ 는 아래의 식 (3)와 같이 상수 β 로 대체할 수 있다.

$$y(x) = \beta + Z(x) \quad (3)$$

여기에서, β 는 n_s 개의 관측된 반응값에 기초되어 추정되어지는 미지의 상수이고, $Z(x)$ 는 전역적 모형으로부터 생성된 지역적 편의(Local Deviation)을 나타내며, 이로 인하여 크리깅 모형이 n_s 개의 데이터를 보간(Interpolation)하게 된다.

$Z(x)$ 의 공분산 행렬(Covariance Matrix)은 아래의 식(4)과 같이 표현될 수 있으며, 이때 R 은 상관행렬이고, $R(x^i, x^j)$ 은 n_s 개의 샘플링 된 데이터 x^i 와 x^j 사이에서의 상관함수이다.

$$Cov[Z(x^i), Z(x^j)] = \sigma^2 R[R(x^i, x^j)] \quad (i=1, \dots, n_s) \quad (4)$$

$\hat{y}(x)$ 를 근사모델이라고 하면, $y(x)$ 와 $\hat{y}(x)$ 의 평균제곱오차 (Mean squared error)가 최소가 되도록 하는 $\hat{y}(x)$ 는 다음과 같이 예측된다.

$$\hat{y}(x) = \hat{\beta} + r^T(x)R^{-1}(y - \hat{\beta}q) \quad (5)$$

여기서 $\hat{\beta}$ 는 β 의 추정치, R^{-1} 은 상관행렬 R 의 역행렬, r 은 상관벡터, y 는 n_s 개의 표본데이터 벡터이고, q 는 n_s 개 성분을 갖는 단위벡터이다.

상관행렬 및 상관벡터는 다음식과 같다.

$$R(x^j, x^k) = \text{Exp} \left[- \sum_{i=1}^n \theta_i |x_i^j - x_i^k|^2 \right] \quad (6)$$

$(j=1, \dots, n_s), (k=1, \dots, n_s)$

$$r(x) = [R(x, x^{(1)}), R(x, x^{(2)}), \dots, R(x, x^{(n_s)})]^T \quad (7)$$

여기서 θ_i 는 i 번째 설계변수에 대응하는 i 번째 모수 (Parameter)이다. 이때, 우도함수(Likelihood function) L 은 다음과 같이 정의된다.

$$L(y; \theta, \beta, \sigma^2) = \frac{(2\pi\sigma^2)^{-n_s/2}}{\sqrt{|R|}} \cdot \text{Exp} \left[- \frac{(y - \beta q)^T R^{-1} (y - \beta q)}{2\sigma^2} \right] \quad (8)$$

식 (8)로부터 로그우도함수를 β 및 σ 에 대해 미분하고 '0'으로 놓으면, β 와 σ^2 의 최대우도추정치는 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{\beta} = (q^T R^{-1} q)^{-1} q^T R^{-1} y \tag{9}$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(y - \hat{\beta}q)^T R^{-1} (y - \hat{\beta}q)}{n_s} \tag{10}$$

그리고, 미지의 모수 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 는 다음 식으로부터 구해진다.

$$\text{maximize} - \left[\frac{n_s \cdot \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln|H|}{2} \right] \tag{11}$$

여기서, $\theta_i (i = 1, 2, \dots, n) > 0$ 이다.

3. 초기 모델의 구조 및 유동해석

3.1 해석모델

이전의 논문에서 특성함수를 이용하여 버터플라이밸브의 디스크를 최적화하였다 (Park et al., 2005). 초기 모델은 그때와 동일하므로 모델 및 해석 방법은 동일하게 하였다.

최적설계하기 위하여 사용된 버터플라이밸브 디스크의 초기 모델은 3D 전용 모델링 프로그램인 CATIA를 사용하여 Fig. 1에 나타내었다.

응력 도출을 위한 구조해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 8.1을 이용하였으며, 사용요소는 Ten-node tetrahedron 요소를 사용하였다. 또한, 압력손실계수의 도출을 위한 유동해석은 범용 CFD 프로그램인 CFX 5.7을 이용하였으며, 사용요소는 Tetrahedron과 Prism요소를 사용하였다. Fig. 2는 구조해석에서의 유한요소모델을 생성하여 하중조건과 구속조건을 부여한 모습을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 전체 모델이 중심선을 기준으로 상하좌우가 대칭이기 때문에 1/4 모델링하여 대칭면에 Symmetry 구속을 주었으며, 디스크와 스템의 연결부에 완전구속을 주었다. 하중조건은 디스크와 유체가 접하는

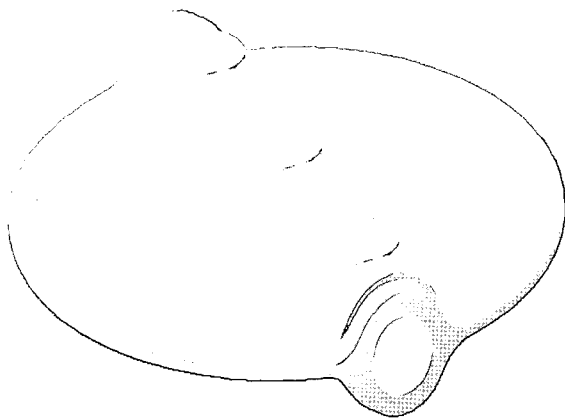


Fig. 1 Configuration of butterfly valve disc

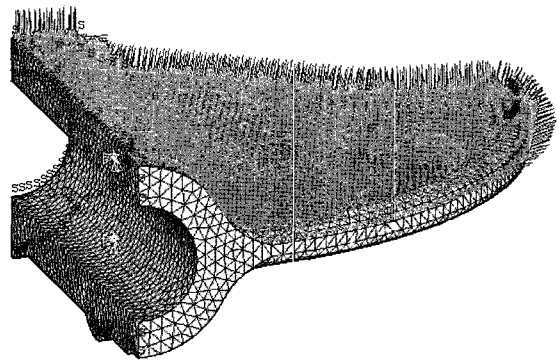


Fig. 2 Load and boundary condition

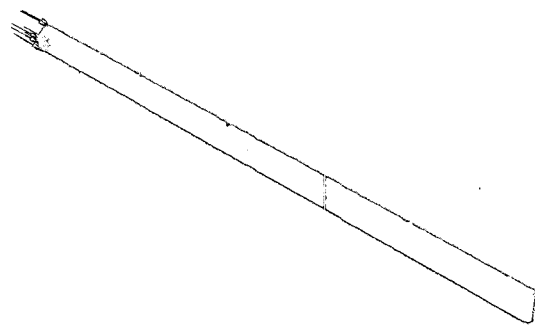


Fig. 3 Boundary conditions for fluid analysis

부위에 ANSI B16.34에서 규정하는 285psi(=1.965MPa)를 적용하였다. 그리고 디스크의 사용 재료인 ASTM A296 CF8M의 물성값인 $E=193 \times 10^3$ MPa, $\nu=0.27$ 을 사용하였다.

Fig. 3은 Kim and Hwang (1993)에 의하여 밸브 배관의 유동이 완전히 발달하는 밸브 직경 D 의 10배 거리를 적용하여 모델링한 후 유동해석을 위하여 경계조건을 적용한 모습을 나타내고 있다. 유동모델은 XY 평면에 대하여 대칭을 이루고 있기 때문에 1/2 모델링하여 대칭면에 Symmetry 구속을 주었다. 유동해석을 위한 내부 유체는 상온(20°C)의 물을 사용하였고, 유동장은 난류유동 모델인 벽함수(Wall function)를 사용하는 $k-\epsilon$ 모델을 이용하여 계산하였다. 그리고 난류 관운동에 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 (4.8768m/s)를 적용하였고, 출구는 대기압으로 설정하였다.

3.2 해석 결과

Fig. 4에는 초기 형상 디스크의 구조해석 결과를 나타내었다. 해석결과에서 알 수 있듯이 디스크와 스템 결합부로 두께가 얇아지기 시작하는 부위에서 최대응력이 발생하였으며, 그 값은 113.47MPa 이다. 그리고 Fig. 5에서는 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.

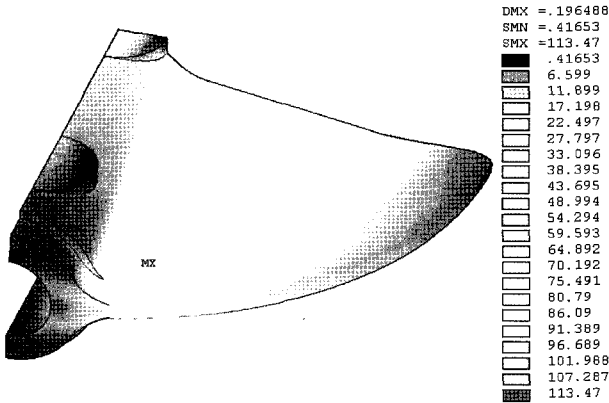
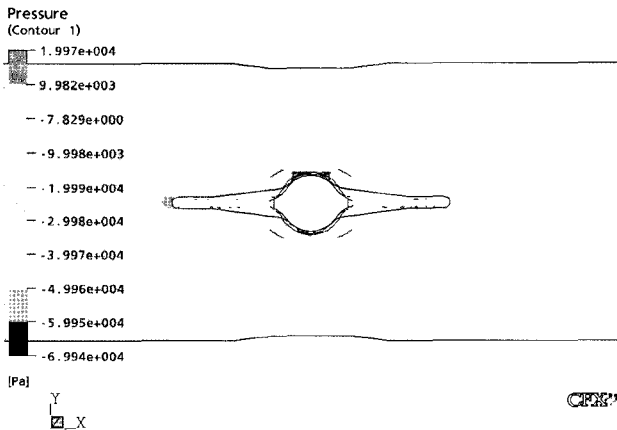
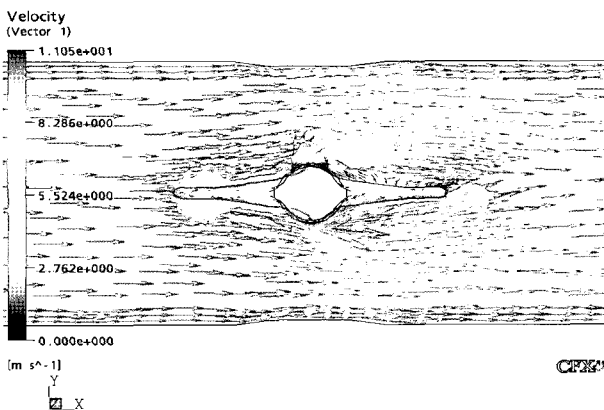


Fig. 4 Structural analysis result of initial model



(a) Pressure distribution



(b) Velocity distribution

Fig. 5 Fluid analysis result of initial model

4. DACE 모델을 이용한 디스크 최적설계

4.1 설계의 정식화

본 논문의 목적은 밸브의 유량특성을 고려하여 구조적 안전성을 만족하는 최적설계의 수행이다. 따라서, 구조적 안전성을 위한 응력과 유량특성을 위한 압력손실계수를 제한함수로 두고, 버터플라이밸브의 가장 큰 장점인 중량의 최소화를 목적함수로 설정하였다. 본 논문에서 디스크를 최적화시키기 위하여 응력의 목표값을 안전율 1.5를 적용하여 136.67MPa, 압력손실계수의 경우 0.45를 목표값으로 선정하였다. 이를 수식으로써 정식화하여 나타내면 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} && \text{Weight} \\
 & \text{Subject to} && \sigma_{all} \leq 136.67 \text{ MPa} \\
 & && C_v \leq 0.45
 \end{aligned} \tag{12}$$

4.2 설계변수 및 수준수

본 연구에서는 이전의 논문에서 특성함수를 이용하여 최적화를 수행한 버터플라이밸브의 정량적 최적해를 구하기 위하여 DACE 모델을 적용하였다. 따라서, 설계변수 및 수준수를 이전 논문과 동일하게 선정하여 최적화를 수행하였다. 초기 디스크 모델의 해석 결과를 바탕으로 응력과 유체의 흐름에 영향을 미치는 디스크의 각 부위에 설계변수 A, B, C, D, F, G의 6곳을 선정하여 Fig. 6에 나타내고 Table 1에 설계변수와 수준수를 정리하였다.

또한, 최소한의 실험 횟수로 많은 횟수의 실험을 수행한 효과를 얻기 위하여 직교배열표를 이용하여 실험을 배치하였다. 이때 직교배열표는 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 직교배열표를 선택하였다. 이 직교배열표는 교호작용을 구하지 않고, 인자만 배치한 것으로 3수준의 열들 (열번호 2~8)간의 교호작용은 $L_{12}(2^{11})$ 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 최대응력, 압력손실계수와 중량을 선정하였다.

Table 2는 혼합직교배열표의 각 조합에 따른 구조해석 결과를 나타낸 것으로 설계변수의 각 수준수의 배치에 따른 최대응력, 압력손실계수와 중량을 나타내고 있다.

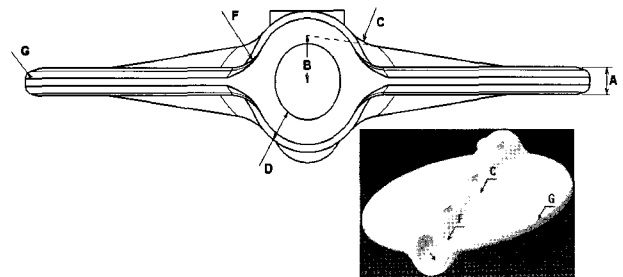


Fig. 6 Design variable of butterfly valve disc

Table 1 Design variable and level

Level	D. V.	A	B	C	D	F	G
	(mm)	(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	

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

Exp.	e	A	B	C	D	F	G	e	Stress (MPa)	Pressure loss Coef.	Weight (Kg)
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	3.299
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

4.3 최적설계

버터플라이밸브의 최적설계를 위하여 직교배열표에 의한 실험 계획에 따라 구조해석을 수행하여 얻어낸 실험점에서의 해를 DACE 모델에 적용하여 최적의 설계변수 값을 찾았다. DACE 모델의 수식 계산은 Microsoft Excel 프로그램을 사용하였다.

DACE 모델인 $\hat{y}(x)$ 는 $\hat{y}(x) = \hat{\beta} + r^T(x)R^{-1}(y - \hat{\beta}q)$ 로써 상관행렬 R에 대한 함수이고, $R(x^j, x^k) = \text{Exp} \left[- \sum_{i=1}^n \theta_i |x_i^j - x_i^k|^2 \right]$ 이므로, θ_i 를 구해야 한다. 이 값은 MLE(Maximum likelihood estimator) 과정을 통하여 결정되는데, 위에서 언급된 식 (11)를 최대화(Maximization)하는 θ^* 를 구하는 과정이며, 구하는 방법은 아래와 같다.

Step 1 : 초기값 θ_i 를 가정하고, 상관행렬 R을 구한다.

Step 2 : R^{-1} 와 $|R|$ 을 구한다.

Step 3 : 상관벡터 r과 전역모델 $\hat{\beta}$ 를 구한다.

Step 4 : $\hat{\sigma}^2$ 을 구하여 목적함수를 구성한다.

이와 같은 과정에 의하여 중량, 응력, 압력손실계수 각각에 대한 θ^* 값을 얻어서 DACE 모델이 구성된다. 그리고 구해진 각각의 DACE 모델을 엑셀 프로그램의 해 찾기(Excel solver) 기능을 이용하여 최적해를 구하였다. $A=7\text{mm}$, $B=12\text{mm}$, $C=18.83\text{mm}$, $D=8.5\text{mm}$, $F=10.7\text{mm}$, $G=2.8\text{mm}$ 의 값을 갖는 경우가 최적 값이다. 초기 모델과 비교해서 중량은 3.08kg으로 9%의 감소효과를 얻으면서 응력은 135MPa, 압력손실계수는 0.37661로 나타났다. 이렇게 최적 설계된 결과는 모든 제한조건을 만족하였으며, 이를 초기모델과 비교하여 Table 3에 정리하였다.

5. 최적해의 신뢰성 검증

DACE 모델을 이용하여 버터플라이밸브를 최적설계한 결과를 신뢰성 검증을 위하여 최적해를 적용한 모델을 재해석하였다.

Table 3 Optimal Solution using DACE model

Result	Weight (Kg)	Stress (MPa)	Press of Coef.
Initial	3.206	113.47	0.479730
Optimum	3.08	135	0.37661



Fig. 7 Configuration of optimum designed disc

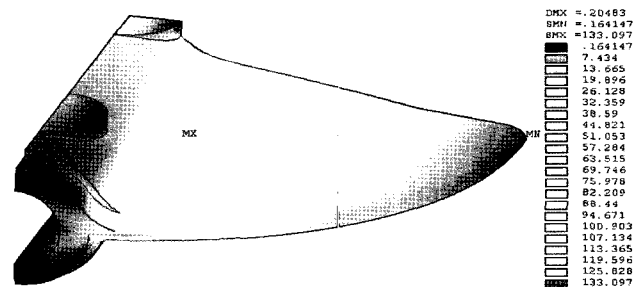
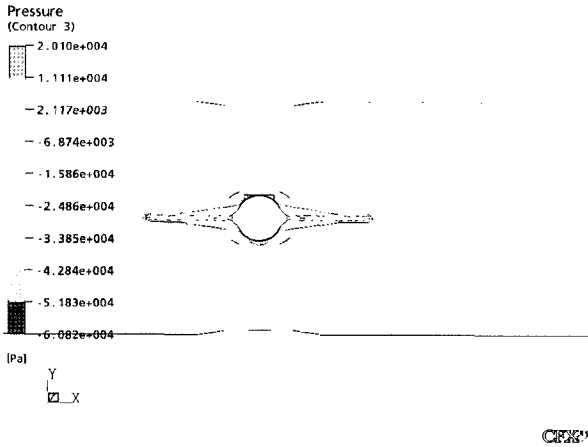
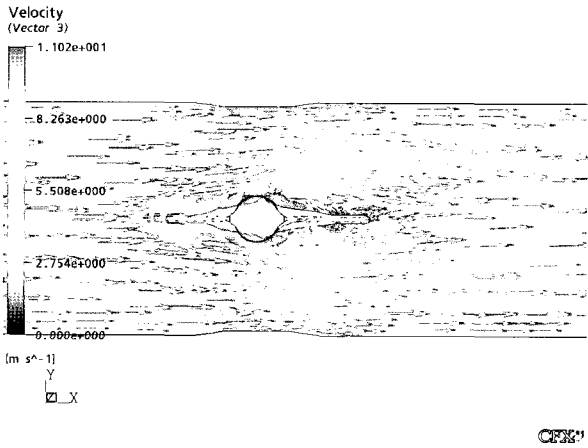


Fig. 8 Structural analysis result of optimum model



(a) Pressure distribution



(b) Velocity distribution

Fig. 9 Fluid analysis result of optimum model

Fig. 7은 최적설계 된 디스크의 형상을 나타낸다. 이를 이용하여 구조해석을 수행한 결과 및 유동해석 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타내었다.

DACE 모델을 이용한 최적설계 결과를 재해석과 비교하여 Table 4에 나타내었다. 각각의 제한조건에 대하여 모두 5% 이하의 매우 높은 유사성을 갖는 값을 가짐을 알 수 있다.

Table 4 Reanalysis solution

Result	Weight (Kg)	Stress (MPa)	Press of Coef.
Optimum	3.08	135	0.37661
Reanalysis	2.98	133.10	0.36290
Error (%)	3.25	1.6	3.6

6. 결 론

본 연구에서는 유동해석 및 구조해석의 수행을 통하여 버터플라이 밸브의 유동특성을 파악하고 구조적 안전성을 만족하기 위한 전산실험계획에 의한 디스크의 최적설계를 수행하였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 직교배열표와 DACE 모델을 사용하여 복잡한 밸브 디스크의 유동특성을 18회의 해석으로 평가가 가능하였다.

(2) 버터플라이밸브 최적화 문제에 DACE 모델을 적용할 경우 효율적인 최적화 수행이 가능함을 확인하였다. 초기모델과 비교하여 약 9%의 중량 감소율을 얻으면서, 응력과 압력손실계수의 제한조건을 충분히 만족하는 최적화된 새로운 형상의 모델을 구해낼 수 있었다.

후 기

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

참 고 문 헌

Addy, A.L., Morris, J.C. and Dutton, J.C. (1985). "An Investigation of Compressible Flow Characteristics of Butterfly Valves", ASME J. Fluid Engineering, Vol 107.

Eom, K. (1998). "Performance of Butterfly Valves as a Flow Controller", ASME J. of Fluids Engineering, Vol 110, pp 16-19.

Guinta, A. and Watson, L. (1998). "A Comparison of Approximation Modeling Techniques: Polynomial Versus Interpolation Models", Proceedings of the 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, St. Louis, MO, AIAA, Vol 2, No 2-4, pp 392-440.

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

Kimura, T., Tanaka, T., Fujimoto, K. and Ogara, K.L. (1995). "Hydrodynamic Characteristics of a Butterfly Valve Prediction of Pressure Loss Characteristics", ISA Transactions, Vol 34, pp 319-326.

Lacor, C. and Hirsch, C. (1988). "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.

Lee, K.H. (2005). Optimization of a Driver-Side Airbag Using Kriging Based Approximation Model", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol 19, No 1, pp 116-126.

- Martin, J. and Simpson, T. (2002). "Use of Adaptive Metamodeling for Design Optimization". Proceedings of the 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Atlanta, Georgia, AIAA, pp 2167-2175.
- Ogawa, K. and Kimura, T. (1995). "Hydrodynamic Characteristics of a Butterfly Valve Prediction of Torque Characteristics", ISA Transactions, Vol 34, pp 327-333.
- Park, S.W. and Lee, S.W. (2000). "Three-Dimensional Flow Characteristics in the Downstream Region of a Butterfly-Type Valve Used in Air-Conditioning Systems", J. of KSME, B, Vol 24, No 2, pp 260-269.
- Park, Y.C., Choi, J.S. and Kang, J. (2005). "A Optimization of Butterfly Valve using the Characteristic Function", Journal of KSOE, Vol 19, No 3, pp 59-65.
- Ryu, J.S., Kim, M.S., Cha, K.J., Lee, T.H., and Choi, D.H. (2002). "Kriging Interpolation Methods in Geostatistics and DACE Model", KSME International Journal, Vol 16, No 5, pp 619-632.
- Sacks, J., Welch, W.J., Mitchell, T.J. and Wynn, H.P. (1989). "Design and Analysis of Computer Experiments", Statistical Science, Vol 4, No 4, pp 409-435.

2005년 11월 24일 원고 접수

2006년 4월 26일 최종 수정본 채택