

회색 관계 분석을 이용한 유량 제어용 버터플라이밸브 형상 최적화 An Optimization for Flow Control Butterfly Valve using Grey Relational Analysis

이상범* · 이동명**

Sang Beom Lee* and Dong Myung Lee**

요지 : 본 연구에서는 버터플라이밸브의 고유 유량 특성을 개선하기 위해 회색 관계분석을 이용한 디스크 형상 최적화 방안을 도입하였다. Class 150의 200A 버터플라이밸브에 대해 적용하여 그 유용성을 확인하였다. 부가물 형상 파라미터의 영향 분석을 위해 직교 배열을 이용한 실험계획법을 실시하였으며, 파라미터의 영향을 회색 관계 분석과 평균 분석을 이용하여 분석하였다. 최적화를 위한 목적함수는 유량 계수를 선정하였으며, 기존 디스크 모델과 부가물 부착 모델에 대해 유동 해석을 수행하였다. 회색 관계 등급을 이용하여 평균 분석을 실시하였으며, 그 결과를 토대로 최적 형상을 결정하였다.

핵심용어 : 유량 제어 밸브, 버터플라이밸브, 회색 관계 분석, 최적화

Abstract : This paper considered optimization method of appending a shape on a disc in an attempt to improve core functions, which are inherent in flow characteristics. The paper also verifies the optimization method of appendage shape with a Class 150 200A Butterfly valve. Then the design of experiment (DOE) with an orthogonal array is performed to analyze the effect of form parameters by grey relational analysis and analysis of mean (ANOM). And this study sets flow coefficient as an object functions for optimization, and the conventional disc model and the optimal appendage shape on disc model are compared by computational fluid analysis. The paper concludes that an optimal appendage shape on disc model achieves wider usability by a wider operating range.

Keywords : Flow Control Valve, Butterfly Valve, Grey Relational Analysis, Optimization

1. 서 론

화석에너지의 수요 증가와 육상에너지자원 고갈의 가속화로 인하여 해양에너지 자원에 대한 개발이 활발히 진행되고 있다. 해양에너지자원 개발시설은 과거에는 대륙붕 내의 수심에 설치되었으나 지속적인 고유가 시대로 인하여 설치 해역이 점점 깊어지고, 그 규모 또한 점점 커지는 추세이다. 이러한 해양플랜트를 포함한 모든 생산 설비에 사용되는 장치와 장비에는 물질, 에너지, 정보의 공급이 있어야 한다. 특히 물질과 에너지 공급의 주된 통로는 파이프를 이루며, 이들 파이프의 기능은 밸브로 조절된다. 담수화 플랜트, 화학 플랜트, 원자력 및 화력 발전소와 공업 단지 내에 구성되어 있는 냉각 시스템, 그리고 앞서 언급한 시스템과 비교하여 상대적으로 작은 시스템이긴 하지만 다양한 플랜트 시스템이 포함된 선박과 같은 시스템에도 다양한 유체를 수송하기 위한 파이프라인은 필수적이다. 다양한 종류의 플랜트는 제품을 생

산하기 위한 많은 제어 루프들이 연결된 시스템이다. 각각의 제어 루프는 각각의 최종 제품의 품질을 보장하기 위해 생산 단계에서 압력, 유량, 수위, 온도 등 다양한 주요 제어 인자들을 요구되는 범위에서 제어 한다(Fisher, 2005).

이러한 플랜트 및 생산 설비의 대형화로 인해 관련 시스템의 설계 요구 조건(온도, 압력, 유량 등)은 더욱 가혹한 조건으로 되어가고 있는 실정이다. 이와 더불어 파이프라인 내부에 흐르는 유체를 적절히 조절하여 시스템이 원활하게 작동할 수 있도록 유체를 제어할 수 있는 제어 밸브(Flow Control Valve)의 사용은 필수적이며, 그 사용량은 증가하는 추세에 있다. 제어 밸브를 포함한 다양한 밸브는 플랜트 시스템의 모든 파이프에 연결되어 있어 밸브를 교체 또는 수리하게 되면 전체 시스템을 중단해야 하는 경우도 있기 때문에 전체 공정에 미치는 영향이 대단히 커서 매우 중요하다(Fisher, 2005).

지금까지 버터플라이 밸브에 대한 연구들은 주로 밸브의 손

*부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터 (First author : Sang Beom Lee, Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan National University, 63-2 beon-gil Busandaehak-ro, Geumjeong-gu, Busan, 609-735, Korea, Tel: +82-51-510-2385, Fax: +82-51-581-3718, lsb7766@pusan.ac.kr)

**한국산업기술시험원 (Corresponding author : Dong Myung Lee, Mechanical Part Tecnology Center, Korea Testing Laboratory, 723, Haean-ro, Sa-dong, Sangnok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, 426-910, Korea, Tel: +82-31-500-0407, Fax: +82-31-500-0406, dmllee1031@ktl.re.kr)

실계수, 토크 특성, 유량 제어 특성 등을 고려한 수치 해석적 연구(Lee et al., 2002)와 밸브의 구조적인 안전성을 고려한 연구(Park et al., 2006)가 수행되어왔다. 그리고 중심형 버터플라이 밸브에 대하여 유동특성과 구조적 안정성을 확보하기 위하여 구조해석과 유동해석을 수행하여 밸브의 특성을 평가하였고, 직교배열표(Orthogonal Array)를 이용하여 디스크의 최적설계를 수행하였다(Park et al., 2006; Song et al., 2009). 또한 중심형 버터플라이 밸브의 압력 강하 특성 분석 및 캐비테이션 발생 예측에 대한 연구가 수행되었다(Ogawa and Kimura, 1995). 이들 버터플라이밸브에 대한 연구는 주로 중심형 버터플라이 밸브에 대해 수행되어 왔으며, 주로 차폐용으로 사용되는 밸브에 대해 주로 연구되어 왔다.

그리고 편심형 버터플라이 밸브의 축편심이 내부유동 특성에 미치는 영향을 분석하기 위한 연구(Park et al., 2011)가 수행되었으며, 편심형 버터플라이 밸브의 시트 형상 변화에 따른 유동 특성 분석을 위한 연구가 수행되었다(Lee et al., 2010). 하지만 기존의 연구는 설계 과정에서 다루어져야 하는 많은 설계 파라미터들 가운데 일부 파라미터를 이용하여 실험 계획법에 따른 직교배열표를 구성하고 이를 기반으로 최적화를 수행하였다. 뿐만 아니라 선택된 일부 파라미터를 이용하여 구성된 실험 계획은 일반적으로 전체 실시법이 아닌 일부 실시법에 따른 실험을 실시하고 이 실험 결과를 이용하여 최적화를 수행하게 된다. 이러한 직교배열을 이용한 실험 계획은 파라미터 범위 내에서 전체 데이터가 아닌 일부분 정보를 이용하여 최적화를 수행하게 되는 단점이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 설계 과정에서 부족한 정보를 이용하여 최적화를 수행하기 위해 다구치 실험 계획법과 회색 이론(Grey Theory)을 적용한 최적화를 수행하고자 한다. 이 최적화 방법을 유량 제어용 버터플라이 밸브의 형상 최적화에 적용하여 최적화 방안의 타당성을 확인하고자 한다.

2. 회색 관계 분석

본 연구에서는 부족한 정보와 다목적 함수를 고려하기 위해 회색 관계 분석을 사용하였다. 회색이론(Grey Theory)은 정보가 전혀 없는 상태를 검은색으로 모든 정보가 있는 상태를 흰색으로 정의하고, 정보가 부족하거나 정확하게 결정되지 않은 경우의 상태를 회색 상태라고 정의한다(Wu, 1996). 회색이론에 따라 정보가 부족한 상태의 시스템을 회색 시스템이라고 정의할 수 있다. 회색 시스템과 회색 현상에 대한 주요 용어는 다음의 세 가지 용어가 있다. 첫 번째는 회색수(Grey Number)이고 시스템에서 부족한 정보의 수를 의미한다. 두 번째는 회색요소(Grey Element)이고 부족한 정보의 요소를 말한다. 마지막 세 번째 요소인 회색 관계(Grey Relation)는 부족한 정보들 사이의 관계를 말한다.

회색 이론의 가장 큰 장점은 부족한 정보와 명확하지 않은 문제에 대해 정도 높게 다룰 수 있으며, 특히 충분한 데이터

가 없는 경우에도 분석도구로서 사용이 가능하다(Wu, 1996; Chiang, 1997). 회색 관계 분석으로 다목적 함수와 파라미터의 상관 정도를 얻을 수 있으며, Lin et al.(2002)은 다구치 방법에서 다목적 문제를 풀기 위해 회색 관계 분석을 이용한 방법을 제안하였다. 다구치 실험 계획법을 이용한 그레이 상관 분석을 수행하는 순서는 다음의 7단계를 통해 수행된다(Krishnaiah and Shahabudeen, 2012).

Step 1: 실험 파라미터의 개수와 수준을 고려한 직교 배열표를 구성하고, 그에 따른 실험을 수행한다.

Step 2: 실험 결과를 목적 함수 별 손실 함수의 특성에 따른 S/N비(Y_{ij})를 망대 특성의 경우 식 (1)에 따라 계산하고, 망소 특성의 경우에는 식 (2), 망목 특성에는 식 (3)과 같이 계산한다.

$$S/N \text{ Ratio} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_{ij}^2} \right) \quad (1)$$

$$S/N \text{ Ratio} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{ij}^2 \right) \quad (2)$$

$$S/N \text{ Ratio} = -10 \log \left(\frac{Y^2}{s^2} \right) \quad (3)$$

Step 3: 데이터를 균등하게 분배하고 추가 분석을 위해 허용되는 범위로 크기를 조절하기 위해 손실 함수의 특성에 따라 망대, 망소, 망목 특성을 각각 식 (4) ~ 식 (6)을 이용하여 ($0 \leq Z_{ij} \leq 1$)로 정규화 한다. 여기서 는 다음과 같이 정의 된다.

Z_{ij} = Normalized value for i^{th} experiment/trial for j^{th} dependant variable/response

$$Z_{ij} = \frac{Y_{ij} - \min(Y_{ij}; i=1, 2, \dots, n)}{\max(Y_{ij}; i=1, 2, \dots, n) - \min(Y_{ij}; i=1, 2, \dots, n)} \quad (4)$$

$$Z_{ij} = \frac{\min(Y_{ij}; i=1, 2, \dots, n) - Y_{ij}}{\max(Y_{ij}; i=1, 2, \dots, n) - \min(Y_{ij}; i=1, 2, \dots, n)} \quad (5)$$

$$Z_{ij} = \frac{|Y_{ij} - T| - \min(|Y_{ij} - T|; i=1, 2, \dots, n)}{\max(|Y_{ij} - T|; i=1, 2, \dots, n) - \min(|Y_{ij} - T|; i=1, 2, \dots, n)} \quad (6)$$

Step 4: 정규화된 S/N비로부터 회색 상관 계수(Grey Relational Coefficient, GC)를 계산한다.

$$GC_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \lambda \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \lambda \Delta_{\max}} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, n - \text{Experiments} \\ j = 1, 2, \dots, n - \text{Responses} \end{cases} \quad (7)$$

GC_{ij} = Grey relational coefficient for i^{th} experiment/trial for j^{th} dependant variable/response

Δ_{ij} = Absolute difference between Y_{oj} and Y_{ij} which is a deviation from target value and can be treated as quality loss.

Y_{oj} = Optimum performance value or the ideal normalized value of j^{th} response.

Y_{ij} = The i^{th} normalized value of the j^{th} response/dependant variable.

Δ_{min} = Minimum value of Δ_{ij}

Δ_{max} = Maximum value of Δ_{ij}

λ = The distinguishing coefficient which is defined in the range $0 \leq \lambda \leq 1$ (the value may be adjusted on the practical needs of the system)

Step 5: 회색 관계 등급(Grey Relational Grade, G_i)를 식 (8)에 따라 계산한다.

$$G_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m GC_{ij} \quad (8)$$

Step 6: 회색 관계 등급을 기반으로 평균 분석이나 분산 분석을 이용하여 파라미터 별 최적 수준을 선정한다.

3. 기존 모델의 유동 해석

Fig. 1은 본 연구의 최적화 대상인 Stub Shaft형식의 Class 150 200A의 이중 편심 버터플라이 밸브이다. Fig. 2는 Class 150 200A의 이중 편심 버터플라이 밸브의 디스크 형상을 나타낸 그림이다. 본 연구에서 최적화 하고자 하는 이중 편심 버터플라이 밸브에 대해 제어 밸브로 주로 많이 사용되는 개도 20도, 40도, 60도에 대해 유량 계수를 계산하였다.

3.1 유동 해석 경계 조건

본 연구에서 Class 150 200A 이중 편심 버터플라이 밸브의 유량 계수를 계산하기 위해 ANSYS CFX 15.0을 사용하였다. 적용 유체는 15°C의 물을 사용하였으며, 유입 속도는 2.0 m/s, 출구 측은 대기압 조건으로 설정하였고, 배관과 밸브의 벽면은 No-Slip Wall로 설정하였다. 적용된 경계조건은 Fig. 3에서 보이는 바와 같으며, 이때의 Reynolds 수는 약

3.37×10^5 이다. 또한 본 연구에서는 밸브 후류에서의 와류를 정확히 모사하기 위하여 SST(Shear-Stress Transport) 난류 모델을 적용하였다.

격자의 크기에 따른 유량 계수의 변화를 살펴보기 위해 부가물이 부착되지 않은 기존의 모델에 대하여 Fig. 4와 같이 격자의 크기를 고려하여 격자수를 20여만 개에서 150여만 개로 변화시켜 유량 계수의 변화를 계산하였다. 이 때 유량 계수는 식 (9)에 따라 계산하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 격자수가 100만개 이내에서는 유량 계수의 변화가 다소 발생하였지만, 격자수가 약 110만개 이상에서 유량 계수의 변화가 미미하게 나타났다. 이에 따라 본 연구에서는 실험 조건의 변화에 따른 격자 크기의 영향을 최소화하기 위하여 밸브 주변의 격자 사이즈는 1.0 mm로 설정하였으며, 나머지 영역

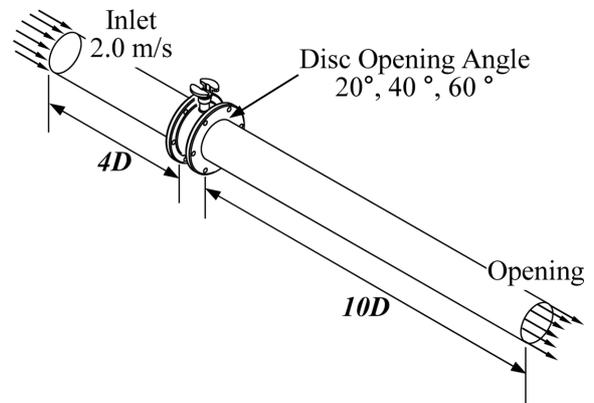


Fig. 3. Boundary Condition.

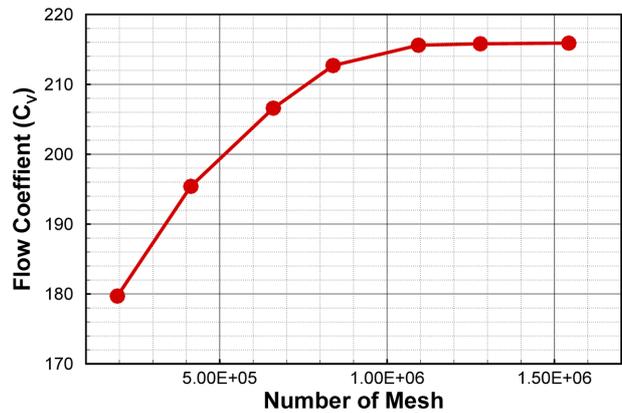


Fig. 4. Mesh Convergence Test.

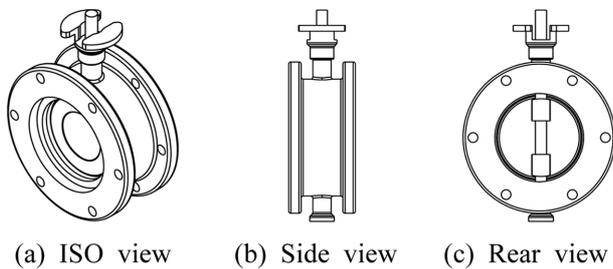


Fig. 1. Class 150 200A Butterfly Valve.

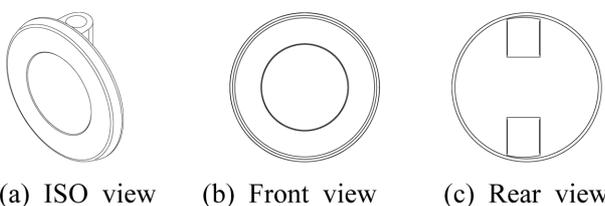


Fig. 2. Class 150 200A Butterfly Valve Disc.

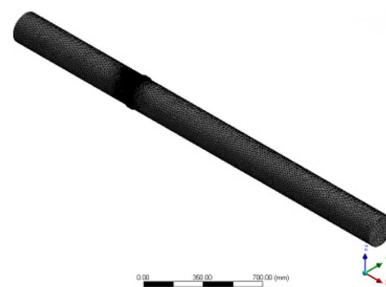


Fig. 5. Mesh Model.

의 격자 사이즈는 평균 20.0 mm로 설정하였다. 이때 적용된 Mesh 형상은 Fig. 5와 같으며 생성된 노드는 약 50 만개, 요소 수는 약 190만개이다.

3.2 해석 결과

유량 계수를 계산하기 위하여 IEC 60534-2-1의 규정에 따라 Fig. 6과 같이 밸브 전단으로 2D, 밸브 후단으로 6D의 위치에서 차압을 계산 하였으며, 식 (9)에 따라 계산하였다. Table 1은 Class 150 200A 이중 편심 버터플라이 밸브의 유량 계수의 계산 결과이다.

$$C_v = \frac{Q}{8.65 \times 10^{-1} \sqrt{\frac{\rho/\rho_0}{\Delta P}}} \quad (9)$$

여기서 C_v , 유량 계수를 나타내고, Q 는 단위 시간당 유량 (m³/h)을 나타낸다. 또한 ρ_0 는 15°C에서의 물의 밀도를 나타내고, ΔP 는 압력 차이(bar)를 나타낸다.

4. 밸브 디스크의 형상 파라미터 선정

본 연구를 위해 선정된 Class 150 200A의 이중 편심 버터플라이 밸브는 유량 제어 밸브로 사용되기는 하지만, 낮은 유량 제어 성능으로 유량 제어 밸브로서 사용성에 제한이 있다. 따라서 본 연구에서는 유량 제어 성능을 향상시키기 위하여 Fig. 7과 같이 다수의 부가물이 부착된 형상의 디스크를 대안 형상으로 선정하였다. 대안 형상의 선정 이유는 부가물의 형상이 부켓살 모양으로 밸브의 후류를 정류시켜 유동의 안정성을 높일 수 있는 형상이기 때문이다.

부가물의 주요 형상 파라미터는 Fig. 8~Fig. 10과 같이 6 개를 설정하였다. 형상 파라미터는 디스크의 전면과 후면에 공통으로 적용되는 파라미터 2개를 선정하였고, 디스크의 전

면과 후면 부가물의 형상을 결정하기 위한 형상 파라미터 4 개를 선정하였다.

디스크의 전면과 후면에 공통으로 적용되는 파라미터는 Fig.

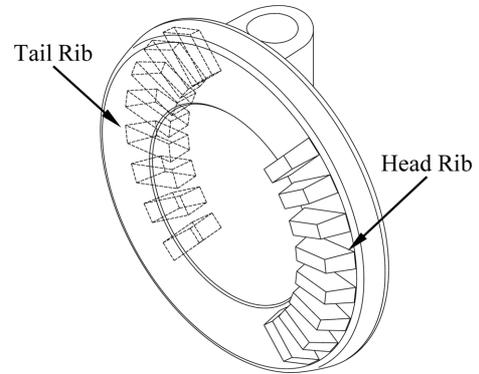


Fig. 7. Alternative Design of Butterfly Valve Disc.

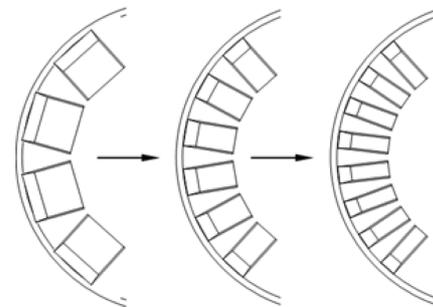


Fig. 8. Number of Ribs.

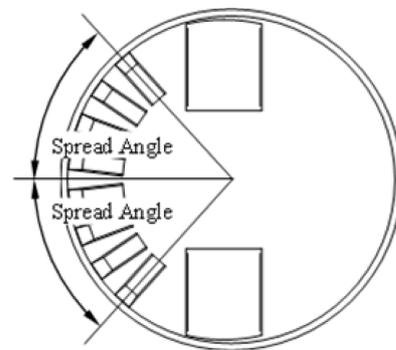


Fig. 9. Spread Angle.

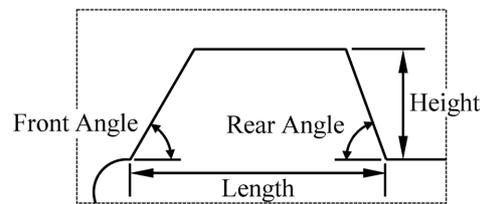


Fig. 10. Rib Section Parameters

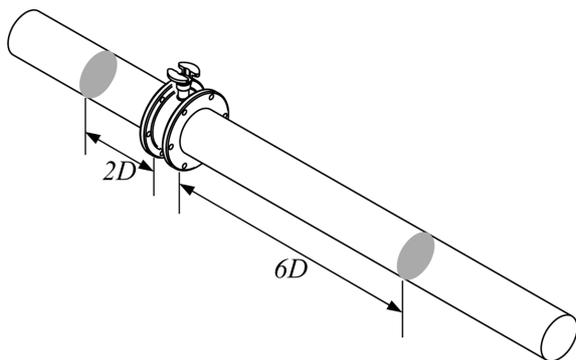


Fig. 6. Pressure Calculation Location for Flow Coefficient.

Table 1. Flow coefficient for Class 150 200A butterfly valve

Opening Angle	Flow Coefficient (C_v)
20	215.6
40	553.4
60	1242.5

8과 같이 부가물의 개수를 4개, 6개, 8개로 변화시켰다. 그리고 부가물의 위치를 Fig. 9와 같이 디스크 중심을 기준으로 부가물이 벌어진 각도인 방사각도로 정의하였다. 디스크의 전면과 후면 부가물의 형상 파라미터는 Fig. 10과 같이 부가물의 높이, 부가물의 길이, 전면 각도(Front Angle), 후면 각도(Rear Angle)로 정의 하였다. Table 2는 주요 형상파라미터

Table 2. Definition of Design Parameters

Symbol	Description	Unit	Level of parameters		
			1	2	3
A	Number of Rib	EA	4	6	8
B	Spread Angle	deg.	35.0	42.5	50.0
C	Front Angle	deg.	40.0	60.0	80.0
D	Rear Angle	deg.	60.0	75.0	90.0
E	Length	mm	25.0	30.0	35.0
F	Height	mm	9.0	13.0	17.0

Table 3. Orthogonal Array Table and Experimental Result

Case	Parameter						Response		
	A	B	C	D	E	F	$C_{V_{20deg}}$	$C_{V_{40deg}}$	$C_{V_{60deg}}$
1	4	35.0	40	60	25	9	195.72	541.14	1140.48
2	4	35.0	40	60	30	13	199.47	543.59	1126.01
3	4	35.0	40	60	35	17	194.49	541.08	1136.00
4	4	42.5	60	75	25	9	188.20	504.65	1063.76
5	4	42.5	60	75	30	13	189.92	506.99	1043.28
6	4	42.5	60	75	35	17	190.22	513.02	1037.08
7	4	50.0	80	90	25	9	157.43	437.48	941.79
8	4	50.0	80	90	30	13	152.39	433.15	916.07
9	4	50.0	80	90	35	17	156.72	436.83	892.33
10	6	35.0	60	90	25	13	197.36	531.00	1100.22
11	6	35.0	60	90	30	17	199.09	537.50	1106.92
12	6	35.0	60	90	35	9	197.51	537.30	1137.88
13	6	42.5	80	60	25	13	175.60	466.02	999.03
14	6	42.5	80	60	30	17	176.57	476.30	998.15
15	6	42.5	80	60	35	9	184.07	494.43	1077.58
16	6	50.0	40	75	25	13	191.84	540.88	1131.52
17	6	50.0	40	75	30	17	194.45	538.47	1131.46
18	6	50.0	40	75	35	9	196.59	545.62	1159.83
19	8	35.0	80	75	25	17	191.04	502.61	1071.55
20	8	35.0	80	75	30	9	190.02	514.22	1111.65
21	8	35.0	80	75	35	13	192.38	516.68	1120.07
22	8	42.5	40	90	25	17	200.02	553.39	1138.72
23	8	42.5	40	90	30	9	201.32	558.74	1161.32
24	8	42.5	40	90	35	13	199.45	562.05	1169.73
25	8	50.0	60	60	25	17	194.49	519.20	1040.21
26	8	50.0	60	60	30	9	195.66	527.85	1120.82
27	8	50.0	60	60	35	13	197.41	535.45	1125.62

에 대한 정의를 나타낸 표이다.

5. 밸브 디스크의 형상 최적화

5.1 회색 관계 분석을 이용한 밸브 디스크 형상 최적화

앞서 정의한 6개의 3 수준 파라미터를 이용하여 디스크 부가물 형상 파라미터 분석을 위해 직교배열 L_{27} 을 선택하였다. 선택된 직교 배열은 형상 파라미터 사이의 교호작용은 고려하지 않고, 주 효과만을 고려하여 직교배열을 구성하였다. Table 3은 구성된 직교 배열표와 해석 결과를 정리한 표이다.

본 연구에서는 최적 부가물 형상 파라미터를 선정하기 위해 회색 상관관계 분석을 실시하였다. 유량 제어 밸브의 유량 제어 성능을 높이기 위해 개도 20도에서 유량 계수는 망소 특성을 가지고, 개도 40도와 개도 60도에서 유량 계수는 망대 특성을 가지도록 하였다.

이를 토대로 회색 상관 분석의 첫 단계로 손실함수의 특성

Table 4. S/N ratio for Experiment

Case	S/N Ratio			Normalized S/N Ratio		
	$C_{V_{20deg}}$	$C_{V_{40deg}}$	$C_{V_{60deg}}$	$C_{V_{20deg}}$	$C_{V_{40deg}}$	$C_{V_{60deg}}$
1	-45.83	54.67	61.14	0.8986	0.8545	0.9064
2	-46.00	54.71	61.03	0.9668	0.8718	0.8593
3	-45.78	54.67	61.11	0.8762	0.8541	0.8919
4	-45.49	54.06	60.54	0.7580	0.5865	0.6492
5	-45.57	54.10	60.37	0.7907	0.6043	0.5774
6	-45.59	54.20	60.32	0.7964	0.6496	0.5553
7	-43.94	52.82	59.48	0.1168	0.0382	0.1993
8	-43.66	52.73	59.24	0.0000	0.0000	0.0970
9	-43.90	52.81	59.01	0.1006	0.0325	0.0000
10	-45.90	54.50	60.83	0.9286	0.7818	0.7737
11	-45.98	54.61	60.88	0.9600	0.8286	0.7961
12	-45.91	54.60	61.12	0.9315	0.8271	0.8980
13	-44.89	53.37	59.99	0.5092	0.2808	0.4172
14	-44.94	53.56	59.98	0.5289	0.3645	0.4140
15	-45.30	53.88	60.65	0.6783	0.5080	0.6969
16	-45.66	54.66	61.07	0.8268	0.8526	0.8773
17	-45.78	54.62	61.07	0.8753	0.8355	0.8771
18	-45.87	54.74	61.29	0.9147	0.8861	0.9686
19	-45.62	54.02	60.60	0.8118	0.5709	0.6761
20	-45.58	54.22	60.92	0.7925	0.6586	0.8119
21	-45.68	54.26	60.98	0.8370	0.6769	0.8397
22	-46.02	54.86	61.13	0.9768	0.9404	0.9007
23	-46.08	54.94	61.30	1.0000	0.9774	0.9733
24	-46.00	55.00	61.36	0.9665	1.0000	1.0000
25	-45.78	54.31	60.34	0.8760	0.6956	0.5665
26	-45.83	54.45	60.99	0.8976	0.7590	0.8422
27	-45.91	54.57	61.03	0.9295	0.8139	0.8580

에 맞도록 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 실험 결과를 Table 4와 같이 S/N비로 변환하였다. 변환된 S/N비를 이용하여 식 (4)와 식(5)에 따라 정규화를 하였다. 세 번째 단계로 정규화된 S/N비를 이용하여 식 (7)에 따라 회색 상관 계수를 계산하였다. 회색 상관계수 계산 시 필요한 구별 계수는 각 개도 별 1.0으로 설정하였다. 마지막 단계로 식 (8)에 따라 회색 관계 등급을 계산한다. Table 5는 회색 상관 계수와 회색 관계 등급을 계산한 결과이다.

마지막 단계로 회색 관계 등급을 이용하여 평균 분석을 실시하였으며, 그 결과는 Table 6과 같다. 평균 분석 결과를 바탕으로 결정된 부가물의 형상 파라미터는 Table 7과 같으며, 그 형상은 Fig. 11과 같다.

5.2 최적 모델의 유동 해석 결과

Table 8은 기존 디스크 모델과 회색 관계 분석을 통한 최적 디스크 모델의 유량 계수를 비교한 표이다. 앞서 설정한

바와 같이 개도 20도에서의 유량 계수는 6.0%의 감소를 보이고 있으며, 개도 40도와 60도에서는 1.9~2.7%의 유량 계수 증가가 있었다. 그 결과로 기존 모델에 비해 저 개도와 고 개도 사이의 유량 계수의 차이가 커져 유량 제어 범위가 증가하는 결과를 얻을 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 이중편심 버터플라이 밸브의 디스크 형상에 대해 다구치 실험 계획법과 회색 이론을 이용하여 최적화를 수행하였다. 유량 계수 최적화를 위한 디스크 형상을 제안하였다. 그리고 부가물 형상에 대한 주요 형상 파라미터를 선정하였다. 선정된 파라미터를 토대로 파라미터의 수준과 범위를 선정하였다. 선정된 수준과 범위를 토대로 다구치 실험 계획에 따른 직교 배열표를 구성하고 이에 따른 유동 해석을 실시하였다. 실험 계획의 결과를 토대로 회색 관계 분석을 실

Table 5. Grey Relational Coefficient and Grey Relational Grade

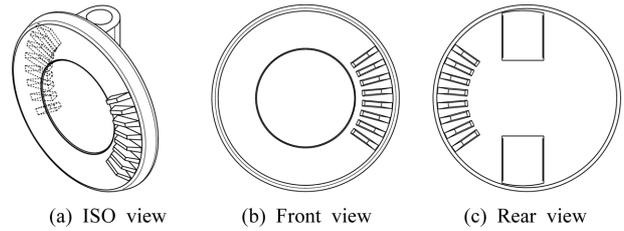
Case	Grey Relational Coefficient			Grey Relational Grade (C_i)
	$C_{V_{20deg}}$	$C_{V_{40deg}}$	$C_{V_{60deg}}$	
1	0.9080	0.8729	0.9145	0.8985
2	0.9679	0.8864	0.8766	0.9103
3	0.8898	0.8726	0.9025	0.8883
4	0.8051	0.7075	0.7403	0.7510
5	0.8269	0.7165	0.7029	0.7488
6	0.8309	0.7405	0.6922	0.7545
7	0.5310	0.5097	0.5553	0.5320
8	0.5000	0.5000	0.5255	0.5085
9	0.5265	0.5083	0.5000	0.5116
10	0.9334	0.8209	0.8154	0.8566
11	0.9616	0.8536	0.8306	0.8820
12	0.9359	0.8526	0.9075	0.8986
13	0.6708	0.5817	0.6318	0.6281
14	0.6797	0.6115	0.6305	0.6406
15	0.7566	0.6702	0.7674	0.7314
16	0.8524	0.8715	0.8907	0.8715
17	0.8891	0.8587	0.8906	0.8795
18	0.9214	0.8977	0.9696	0.9296
19	0.8416	0.6998	0.7554	0.7656
20	0.8282	0.7455	0.8417	0.8051
21	0.8598	0.7558	0.8619	0.8258
22	0.9773	0.9438	0.9097	0.9436
23	1.0000	0.9779	0.9740	0.9840
24	0.9676	1.0000	1.0000	0.9892
25	0.8897	0.7666	0.6976	0.7846
26	0.9071	0.8058	0.8637	0.8589
27	0.9342	0.8431	0.8757	0.8843

Table 6. Mean Response Table for Grey Relational Grade

Level	A	B	C	D	E	F
1	0.7226	0.8590	0.9216	0.8028	0.7813	0.8210
2	0.8131	0.7968	0.8244	0.8146	0.8019	0.8026
3	0.8712	0.7512	0.661	0.7896	0.8237	0.7834
Delta	0.1486	0.1078	0.2606	0.025	0.0424	0.0376
Rank	2	3	1	6	4	5

Table 7. Selected Design Parameters from Grey Relational Analysis

Symbol	Description	Unit	Selected parameters
A	Number of Rib	EA	8
B	Spread Angle	deg.	35.0
C	Front Angle	deg.	40.0
D	Rear Angle	deg.	75.0
E	Length	mm	30.0
F	Height	mm	9.0

**Fig. 11.** Class 150 200A Butterfly Valve Disc.**Table 8.** Comparison of Flow coefficient

Opening Angle(deg.)	Flow coefficient (C_v)		Increment ratio(%)
	Original Disc	Optimized Disc	
20	215.6	202.7	-6.0
40	553.4	563.9	1.9
60	1242.5	1276.6	2.7

시하여 회색 관계 등급을 계산하였다. 회색 관계 등급을 이용하여 평균 분석을 실시하였으며, 그 결과를 토대로 최적 형상을 결정하였다.

기존 모델과 최적 모델의 유량 계수를 비교해 보면, 개도 20도에서는 -6.0%가 감소하였고, 개도 40도와 60도에서는 각각 1.9%와 2.7%로 증가하였다. 이상에서 최적화된 모델은 기존 모델에 비해 유량 제어 범위가 약 9% 개선된 결과를 확인하였다. 이에 따라 본 연구에서 적용한 회색 관계 분석을 통한 최적화 기법은 유량 버터플라이 밸브의 형상 최적화에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- Chiang, K.S. (1997). The Introduction of Grey Theory. Gauli Publishing Co., Taipei.
- Fisher. (2005). Control Valve Handbook. Emerson Process Management, Iowa.
- Ogawa K. and Kimura Takeyoshi. (1995). Hydrodynamic characteristics of a butterfly valve - Prediction of torque characteristics, ISA Transactions, 34(4), 327-333.
- Krishnaiah K. and Shahabudeen P. (2012). Applied Design of Experiments and Taguchi Method. PHI Learning Private Limited, New Delhi.
- Lee J.U., Lee D.H. and Choi Y.H. (2002). Numerical Analysis of Incompressible and Compressible Flow Around a Butterfly Valve. Journal of Energy Engineering, 11(1), 26-33.
- Lee J.W., Choi H.K. and Yoo G.J. (2010). Characteristic of butterfly valve flow with different design factors. Journal of computational fluids engineering, 15(1), 64-70.
- Lin, C.L., Lin, J.L. and Ko, T.C. (2002). Optimization of EDM Process Based on the Orthogonal Array with Fuzzy Logic and Grey Relational Analysis Method. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 19(4), 271-277.
- Park S.M., Choi H.K. and Yoo G.J. (2011). Study on flow charac-

- teristics for eccentric shaft in the butterfly valve system. Proceedings of Korean Society for Computational Fluid Engineering, 2011(5), 587-591.
- Park Y.C., Kang J.H., Lee J.M. and Kang J. (2006). Optimization of Butterfly Valve's Disc Using the DACE Model Based on CAE. Journal of Ocean Engineering and Technology, 20(3), 96-102.
- Park Y.C., Choi J.S. and Kang J. (2005). A Optimization of Butterfly Valve using the Characteristic Function. Journal of Ocean Engineering and Technology, 19(3), 59-65.
- Song, X. G., Wang, L., Baek, S. H. and Park, Y. C. (2009). Multidisciplinary optimization of a butterfly valve. ISA transactions, 48(3), 370-377.
- Wu, H.H. (1996). The Introduction of Grey Analysis. Gauji Publishing Co., Taipei.
-

Received 2 October, 2014

Revised 17 November, 2014

Accepted 15 December, 2014