

특성함수를 이용한 펌프 제어 밸브의 편심축 결정

신명섭* · 이상일* · 박경진** · 윤준용†**

Determination of Eccentric Axis for Pump Control Valve Using the Characteristic Function

Myung-Seob Shin*, Sang-Il Yi*, Gyung-Jin Park**, Joon-Yong Yoon†**

Key Words : Pump control valve(펌프 제어 밸브), Characteristic function(특성함수), Eccentric axis(편심축), Pressure drop(압력강하)

ABSTRACT

The pump control valve is a butterfly valve that has an eccentric rotating axis. It is not only used as a butterfly valve to control the flow rate or pressure, but also as a check valve to prevent backward flow. A new design method of eccentric rotating axis is proposed to design the valve. The height of the rotating axis is determined through flow field analysis. A general purpose of computational fluid dynamics software system, Fluent is used to simulate the fluid flow. Flow field analysis is performed for various heights of the rotating axis and different opening angles of the valve. A characteristic function is defined for estimating the flow characteristics based on the results of flow field analysis. The characteristic function is defined in order to determine the height of the rotating axis. An optimization problem with a characteristic function is formulated to determine the amount of eccentricity. The height of the rotating axis of the valve is determined through solving the optimization problem.

1. 서론

산업체에서 유량을 효과적으로 제어하기 위해서 볼 밸브(ball valve), 글로브 밸브(globe valve), 버터플라이 밸브(butterfly valve) 등 여러 종류의 밸브들이 사용되고 있다. 그 중 버터플라이 밸브는 원관 내부에 설치된 원형 디스크를 회전시킴으로써 비교적 낮은 압력에서 유체의 큰 흐름을 포함하는 개폐와 유량을 조절하는 목적으로 주로 사용한다.

버터플라이 밸브는 디스크의 회전축 위치에 따라 동심 혹은 편심 버터플라이 밸브로 구분된다. 동심 버터플라이 밸브(concentric butterfly valve)는 통상적으로 단순 개폐 차수 용도로 사용되며, 밸브 몸체(valve body)의 중앙에 단순한 디스크가 설치된다. 편심 버터플라이 밸브(eccentric butterfly valve)는 밸브 몸체의 중앙에 편심되게 설치된 밸브 디스크를 이용하여 고성능 교축 제어(throttling services)가 가능하도록 특별히 설계되며, 버터플라이 밸브 중 유량 제어밸브로 사용되는 것은 대부분 편심 버터플라이 밸브로 설계한다⁽¹⁾.

기존의 버터플라이 밸브에 대한 실험적, 수치적 연구는 주로 버터플라이 밸브를 관로(pipeline)에 설치함으로써 발생하는 밸브의 수력학적 특성(Hydrodynamic

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 한양대학교 공학대학 기계정보경영공학부

† 교신저자 E-mail : joyoon@hanyang.ac.kr

characteristic)⁽²⁾, 유량제어 특성⁽³⁾, 유량 조절에 의해 발생하는 공동현상⁽⁴⁾과 밸브 디스크의 토크(torque)⁽⁵⁾에 대한 연구 등이 이루어졌다. 또한 최근에는 버터플라이 밸브의 유동 안정성을 확보하면서 동시에 밸브의 구조적 안정성을 고려하고자 하는 연구로 확대 진행되었다. 박영철, 최종섭 등⁽⁶⁾은 수치적인 방법을 이용하여 유동장 해석과 구조해석 결과를 표현할 수 있는 특성함수를 도입하여 버터플라이 밸브 디스크 형상에 대하여 실험계획법을 이용하여 최적설계에 적용하였다.

펌프 제어 밸브는 유량제어밸브와 체크밸브의 역할을 동시에 수행할 수 있는 장점이 있지만, 회전축이 편심으로 위치하기 때문에 이로 인해 유동특성이 좋지 않은 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 편심축의 위치결정이 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 편심축의 위치를 결정하는 특성함수를 제안한다. 제안된 특성함수는 펌프 제어 밸브의 순방향과 역방향의 유동특성을 모두 포함한다. 이러한 특성함수를 목적함수로 하는 최적설계 문제를 정식화하고, 여러 직경의 밸브에 대해 유동해석을 실시하여 펌프 제어 밸브 편심축의 최적 높이를 결정한다.

2. 이 론

2.1. 유체유동 지배방정식

난류유동장 내의 유체유동은 다음과 같은 연속방정식, 운동량방정식 그리고 난류모델방정식의 지배를 받는다.

연속방정식(continuity equation):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식(Reynolds-averaged Navier-Stokes equation):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{jj} \right] + \rho f_j \quad (2)$$

Navier-Stokes 방정식을 시간 평균한 방정식인 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equation) 방정식은 레이놀즈 응력이라고 하는 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 의 미지항을 추가적으로 포함하게 된다. 이 RANS 방정식

을 종결(closure)시키기 위해 모델링이 필요하다. 본 연구는 공학해석에서 일반적으로 가장 널리 사용되고 있는 표준 k-ε 난류모델을 사용하였다. 이 모델은 속도와 길이 척도를 추정하기 위하여 난류운동에너지와 소산율의 수송을 지배하는 다음과 같은 k와 ε에 관한 두 개의 미분방정식을 도입한다.

표준 k-ε 난류모델(standard k-ε turbulence model):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon_2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

여기서 와점성 계수(kinematic eddy viscosity, ν_t)는 다음과 같이 정의되고,

$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

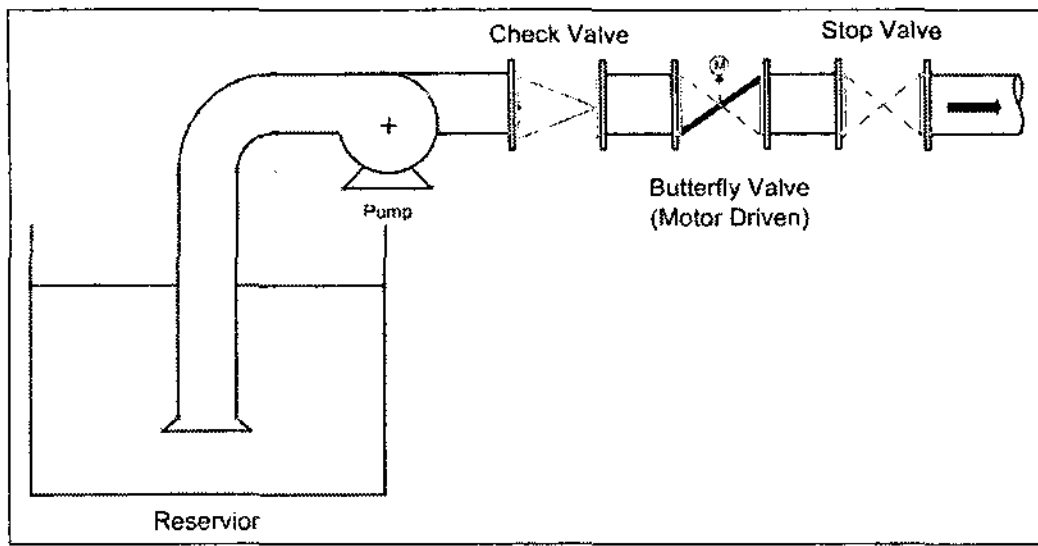
이때의 모델링 상수는 $C_{\varepsilon_1} = 1.44$, $C_{\varepsilon_2} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 이다.

3. 펌프 제어 밸브와 수치계산 방법

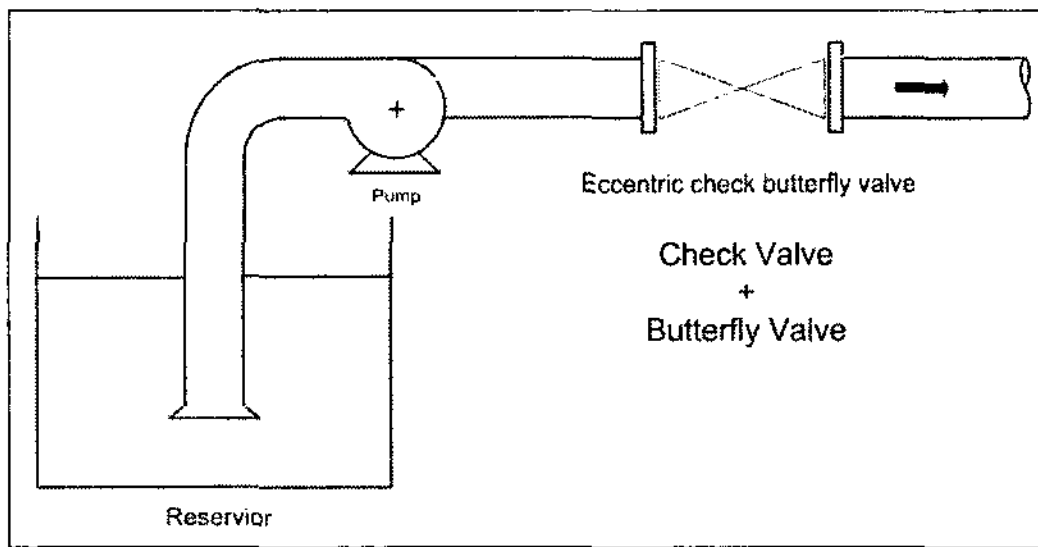
3.1. 펌프 제어 밸브 (Pump control valve)

펌프 제어 밸브는 주로 펌프장 등에서 많이 사용되며, 비교적 낮은 압력의 가스나 액체의 큰 흐름을 포함하는 개폐와 유량 조절에 사용된다. 펌프 제어 밸브의 장점은 다른 밸브에 비해 중량이 가볍고 공간을 작게 차지하며, 전개에서 전폐의 위치로 바뀌는데 매우 빠르다. 그리고 유량조절 기능을 하는 버터플라이 밸브의 역할과 역류방지 기능을 하는 체크밸브(check valve)의 역할을 동시에 수행하는 장점을 가지고 있다.

Fig. 1은 펌프장에 설치된 밸브의 두 형태를 나타낸 그림이다. Fig. 1(a)는 일반적인 펌프장의 설비로써 펌프와 더불어 체크밸브와 유량 제어밸브인 버터플라이 밸브가 동시에 설치되어 있는 펌프장의 설비를 보여주



(a) General type of the pumping station

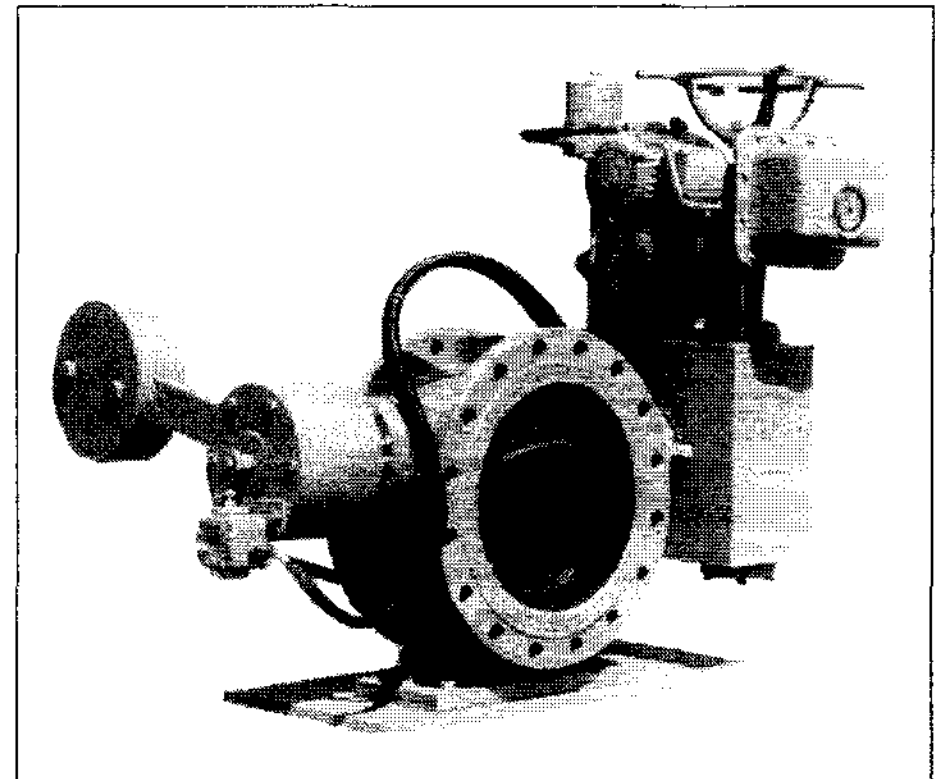


(b) Installation of an eccentric check butterfly valve.

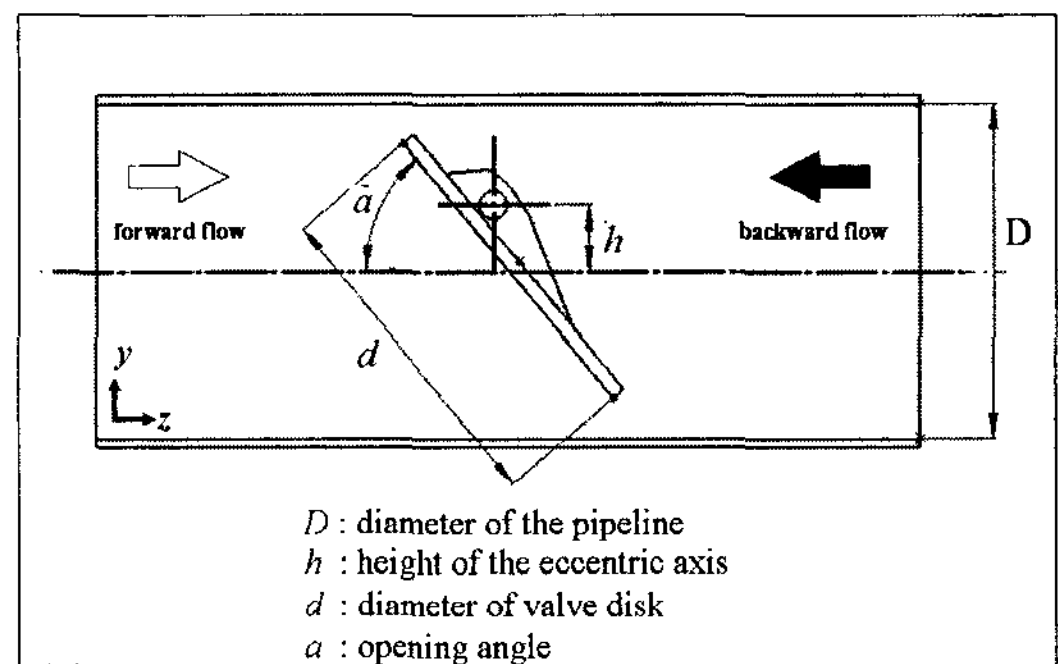
Fig. 1 Schematic of pumping station

고 있다. 이때의 체크 밸브는 관로로부터 심정 또는 입구부로 물이 역류되지 않도록 펌프장, 그리고 특히 깊이가 깊은 심정 펌프설비에 널리 사용된다. 체크 밸브를 설치할 때는 역류가 발생할 시 급격하게 폐쇄되는 밸브 디스크면에 과도한 압력이 상승하게 되는 슬램서지(slam surge) 현상이 빈번하게 발생할 수 있음을 고려하여야 한다. 슬램서지 현상은 체크 밸브의 인접 구조물인 펌프, 제어밸브 및 관로에 심각한 파손을 야기할 수 있다. 이러한 원인에 의해서 Fig. 1(a)처럼 체크 밸브와 버터플라이 밸브를 모두 설치할 때, 체크 밸브인 경우는 가능한 한 펌프로부터 적어도 관직경의 약 4~5 배 이하로 설치하여야 하고, 버터플라이 밸브는 인접 구조물로부터 상류쪽(upstream)으로는 관직경의 3 배 이상, 하류(downstream)는 관직경의 2 배 이상을 확보해야 하는 공간상의 제약이 있다^(7~8). 이에 반하여 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 펌프 제어 밸브는 유량제어 밸브와 체크밸브 역할을 동시에 수행하는 장점으로 인하여 협소한 공간에도 설치가 가능하다. 그리고 펌프 트립(pump-trip) 시에 약간의 역류를 허용하면서 점차 이 역류량을 감소시켜 슬램서지를 완화하고, 펌프 출구부에 체크 밸브 등을 설치하였을 때 생기는 과도현상을 제어할 수 있다.

Fig. 2(a)는 본 연구의 대상물인 펌프 제어 밸브의



(a) Photographs of valve



(b) Schematic of the pump control valve

Fig. 2 The pump control valve

사진이다. 외부에 밸브의 개폐를 조절하는 액츄에이터가 있으며, 역류발생시 최단시간에 밸브 폐쇄를 위한 무게 추(counter weight)가 있다. Fig. 2(b)는 펌프 제어 밸브의 측면도이다. D 는 관 내경, h 는 관 중심으로부터 편심축까지의 높이, d 는 밸브 디스크의 직경, a 는 밸브의 개도이다. 관 중심으로부터의 거리(h)가 밸브 중심축의 편심량($e=h/R$)을 나타낸다. 펌프 제어 밸브는 유동 흐름의 안정성을 위해 이 편심량의 결정이 매우 중요하며 또한 밸브 개도를 변화시켜 유량을 조절한다.

앞서 설명한 바와 같이 펌프 제어 밸브는 체크밸브의 역할도 매우 중요하다. 펌프 제어 밸브는 외부 유압기구를 사용하여 폐쇄되는 속도를 제어함으로써 역류량을 조절하여 수충압을 완화한다. 이에 펌프 제어 밸브는 관로가 짧고 실양정이 큰 경우에 주로 사용하는데, 이것은 짧은 시간 내에 최소의 압력변화로 적은 역류, 역전을 허용하면서 유동을 차단할 수 있다.

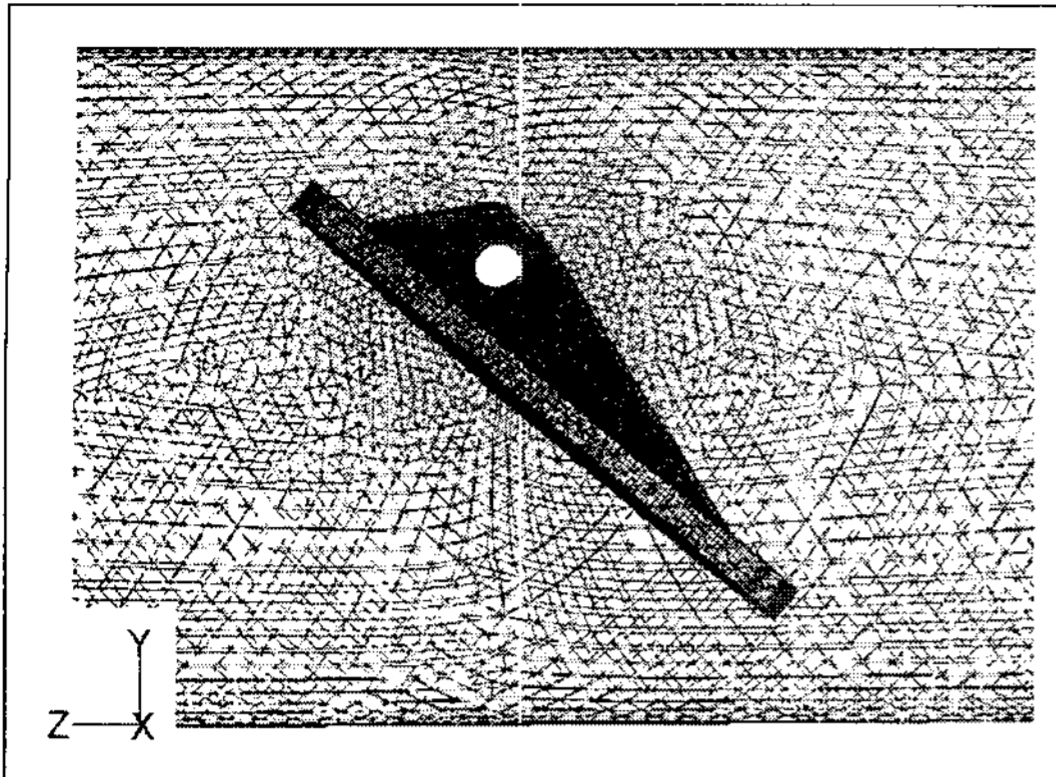


Fig. 3 Grid configuration

3.2. 수치계산 방법

본 연구에서는 밸브 내부를 흐르는 유체의 유동 분석을 통해 최적의 편심축 위치를 선정하기 위하여, 현 설계점의 편심량인 0.367기준으로, 기준부터 0.017 간격으로 편심량이 0.350에서 0.417까지, 소구경 밸브부터 대구경 밸브까지 4가지의 지름과 각 지름에 대한 5가지의 높이, 그리고 각각의 편심량에 대해 밸브가 일반적으로 가장 많이 운전되는 상태인 35°에서 80° 사이를 15° 간격으로 순방향과 역방향의 상태로 총 160가지의 유동장 해석을 수행하였다.

각 경우의 격자는 밸브의 개도에 따라 비정렬 격자 (unstructured grid)를 사용하여 유동의 입구부는 밸브 전단부터 관직경의 5배 거리에 위치하며, 출구부는 유동이 완전히 발달하게 되는 밸브의 후단으로부터 관직경의 10배 거리를 적용하여 유동장 해석을 수행하였다⁽⁹⁾. 밸브 내부를 흐르는 유체의 유동현상을 해석하기 위하여 상용 유동해석 프로그램인 FLUENT 6.1⁽¹⁰⁾을 사용하여 유동장을 해석하였다.

펌프의 정상 운전시 발생하는 유동을 수치계산하기 위하여 밸브 내의 유동은 3차원 정상상태(steady state)이고, 작동유체는 상온(20°C)의 물로서 비압축성 유동(incompressible flow)이라 가정하였으며, 밸브 내의 난류거동을 모사하기 위해 난류유동 모델인 벽함수 (wall function)을 사용하는 표준 k-ε 모델을 사용하여 계산을 수행하였다. 압력 및 속도 보정은 SIMPLEC 알고리즘⁽¹¹⁾을 사용하였다. 일반적인 유동의 형태인 순방향일 때의 경계조건으로 입구부에서는 팔당 취수펌프장에 설치된 펌프 제원⁽¹²⁾을 토대로 펌프가 정상 운전시 유입되는 유량(Q=229.7 m³/min)을 기준으로 유량

일정 조건을 경계조건으로 사용하였으며, 출구부는 매 반복횟수 시 마다 유량을 보정해주는 유량일정 조건을 사용하였다. 그리고 펌프 트립 시 발생하는 역방향 유동은 순방향 유동과는 유동의 방향은 반대로 하고, 입구부와 출구부의 경계조건은 순방향과 같다.

4. 유동해석 결과와 특성함수를 이용한 펌프 제어 밸브의 편심축 결정

앞서 설명한 바와 같이, 펌프 제어 밸브는 편심축의 위치결정이 중요하다. 본 연구에서는 편심축의 위치를 결정하기 위해 특성함수를 이용한 최적설계 방법을 사용한다. 편심축의 높이를 결정하는 최적설계 정식화는 다음과 같다⁽¹³⁾.

$$\text{Find } h \tag{6}$$

$$\text{to minimize } \Phi = w_1 \sum_a w_a \frac{\Delta P_a^h}{\Delta P_a^{0.367}} + w_2 \sum_a w_a \frac{M_a^{0.367}}{M_a^h} \tag{7}$$

식 (7)은 밸브의 유동특성을 평가하기 위한 특성함수이다. 유동특성은 순방향과 역방향의 두 경우를 포함한다. 밸브 내부의 유동해석을 통해 각 지름에 따른 편심량과 밸브 개도에 따른 유동특성을 해석하였다. 표 1은 각 지름의 경우에 대한 순방향과 역방향의 유동해석 결과이다. 순방향 유동해석에 대해 각 경우의 입구부와 출구부 사이의 압력강하($\Delta P_a^h = P_{in} - P_{out}$)를 표시하였고, 펌프 트립에 의한 역류가 발생하는 역방향 해석의 경우는 각 경우의 편심축에 걸리는 모멘트 ($M_a^h = \vec{R}_{ab} \times \vec{F}$)로 정리하였다. 여기에서 \vec{R}_{ab} 은 밸브 축 중심으로부터 밸브 디스크 표면에 힘이 작용하는 거리를 말한다.

각 지름에서의 계산결과는 편심량 0.367의 결과를 기준으로 정규화하였다. 이렇게 정규화한 결과를 압력강하 값과 역수를 취한 밸브 디스크에 작용한 모멘트 합의 형태로 특성함수를 구성하였다. 밸브 디스크에 작용한 모멘트를 역수를 취한 이유는 그 값이 클수록 더 좋은 결과를 나타내기 때문이다. 따라서 이러한 특성함수로부터 구한 특성치는 그 값이 적을수록 더 좋은 유동특성을 표현한다. 위 식에서 w_1, w_2 는 순방향과 역방향 유동장 해석결과에 대한 가중치이고, w_a 는 각 편심축 높이에서 밸브의 개도에 따라 부여한 가중치이다. 일반적으로 유동제어 기능인 순방향 유동이 역방향 유동에 비해 많은 운용 시간을 차지하고 있으며, 역방향

특성함수를 이용한 펌프 제어 밸브의 편심축 결정

Table 1. Comparison of the characteristic valves

Diameter (D)	Eccentricity (e=h/R)	Pressure drop (kPa) [forward flow]				Total moment (kN·m) [backward flow]				Characteristic Value(Φ)
		35°	50°	65°	80°	35°	50°	65°	80°	
400 mm	0.350	10491.8	3019.2	857.1	233.7	148.5	53.8	24.5	11.4	1.0000
	0.367	10473.6	2992.2	855.3	234.8	154.6	55.9	25.3	11.8	0.9973
	0.383	10544.1	3013.2	855.3	239.8	160.4	58.2	26.3	12.1	0.9991
	0.400	10474.5	3041.0	869.6	239.9	165.6	60.7	27.1	12.5	1.0052
	0.417	10488.0	3058.2	873.2	242.6	171.8	62.6	27.9	12.8	1.0087
1200 mm	0.350	134.2	39.2	11.3	3.4	50.3	18.5	8.4	3.9	1.0000
	0.367	134.0	38.9	11.4	3.5	52.5	19.2	8.7	4.0	0.9989
	0.383	134.8	38.9	11.3	3.5	54.6	20.0	9.1	4.1	0.9999
	0.400	134.1	39.4	11.5	3.5	56.0	20.8	9.3	4.3	1.0042
	0.417	134.0	39.6	11.6	3.6	58.3	21.5	9.6	4.4	1.0096
2000 mm	0.350	34.4	10.0	2.927	0.898	56.6	20.8	9.6	4.4	1.0000
	0.367	34.3	9.9	2.933	0.910	59.2	21.7	10.0	4.6	0.9996
	0.383	34.5	10.0	2.928	0.917	61.4	22.6	10.3	4.7	1.0017
	0.400	34.4	10.1	2.966	0.922	63.0	23.5	10.6	4.8	1.0050
	0.417	34.3	10.1	2.984	0.955	65.7	24.2	11.0	5.0	1.0138
3000 mm	0.350	3.502	1.031	0.313	0.113	20.259	7.513	3.496	1.665	1.0000
	0.367	3.499	1.024	0.313	0.126	21.175	7.805	3.616	1.722	0.9970
	0.383	3.515	1.030	0.313	0.120	22.099	8.143	3.753	1.760	1.0105
	0.400	3.499	1.039	0.317	0.129	22.546	8.453	3.859	1.821	1.0489
	0.417	3.497	1.042	0.319	0.185	23.492	8.725	3.977	1.870	1.1436

유동 시에는 구조적 특성이 유동특성보다 더 중요하다고 판단하여 가중치를 $w_1 = 0.9$, $w_2 = 0.1$ 로 부여한다. 또한 각 지름에서의 각 편심량에 따른 밸브의 개도에 따라 적용한 가중치 w_a 는 각 밸브의 개도를 동등하게 반영하기 위해 모두 0.25으로 부여하였다. 이와 같은 특성치를 각각의 편심량에 대해 수치 계산해 본 결과를 표 1에 유동결과와 함께 정리하였다.

Fig. 4는 위에서 구한 각각의 특성치를 각 지름에 따라 그래프로 표시한 결과이고, 그 결과를 토대로 2차 근사화를 수행하였다. 각각의 경우에 대해 2차 근사화를 하고 구한 최적의 편심량 ($e^{optimum}$)은 다음과 같다.

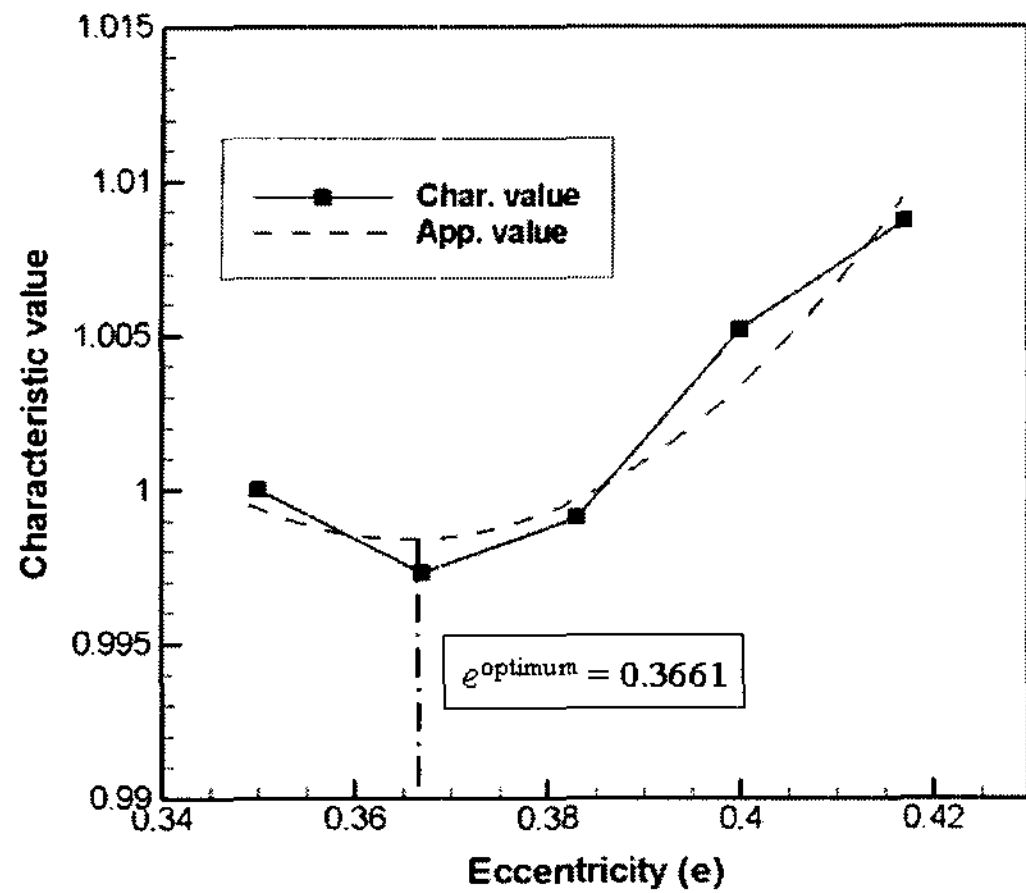
- (1) $D = 400$ mm 일 때, $e^{optimum} = 0.3661$
- (2) $D = 1,200$ mm 일 때, $e^{optimum} = 0.3653$
- (3) $D = 2,000$ mm 일 때, $e^{optimum} = 0.3649$
- (4) $D = 3,000$ mm 일 때, $e^{optimum} = 0.3656$

이렇게 구한 최적의 편심량은 기존 설계 모델인 0.367을 기준으로 아래쪽에 위치한다. 이러한 값들을 바탕으로 회전축의 높이를 결정하면 기존의 설계안에 비

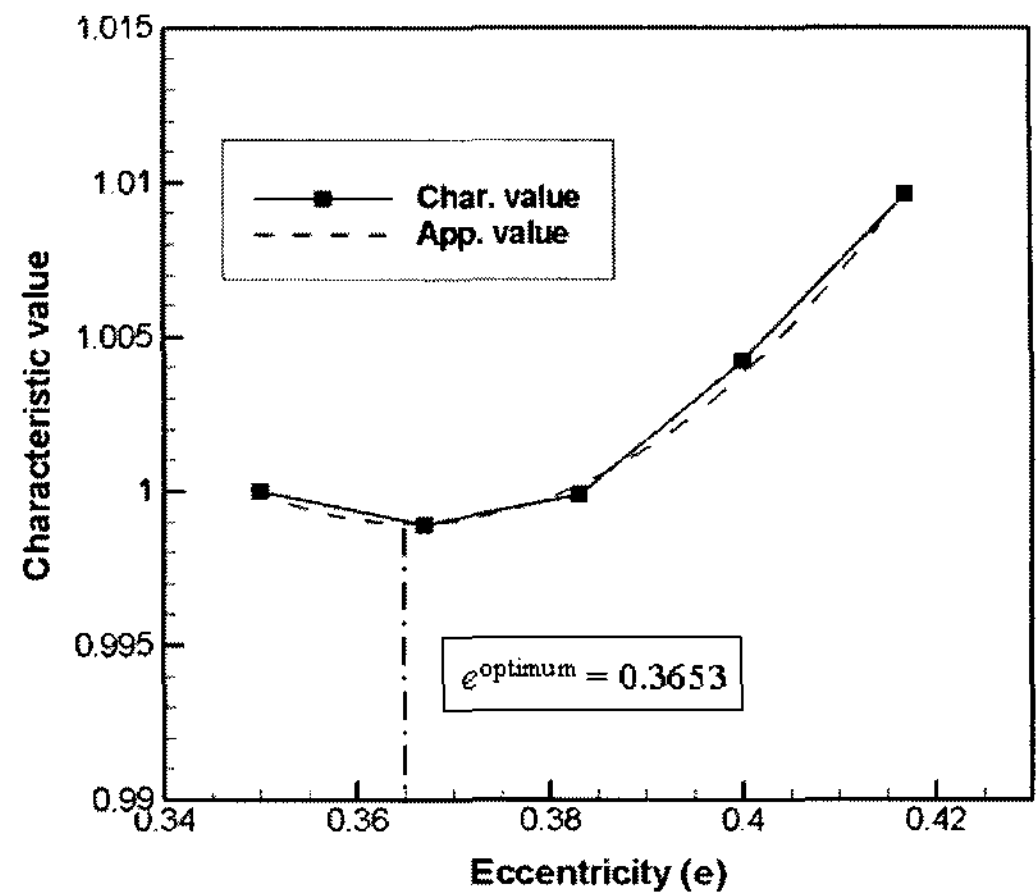
해 더욱 안정한 유동 특성을 가질 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 이 값들은 유동해석 결과를 바탕으로 한 근사최적 값이기 때문에, 확인 실험이 필요하다. 또한 그 결과가 기존의 설계안과 유사하기 때문에 설계 변경은 필요하지 않을 것으로 사료된다. 따라서 기존 설계안의 유동특성이 안정함을 증명할 수 있었다. 또한 이러한 최적설계 방법은 새로운 형태의 밸브 설계 시 적용하여 편심축의 높이 결정에 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

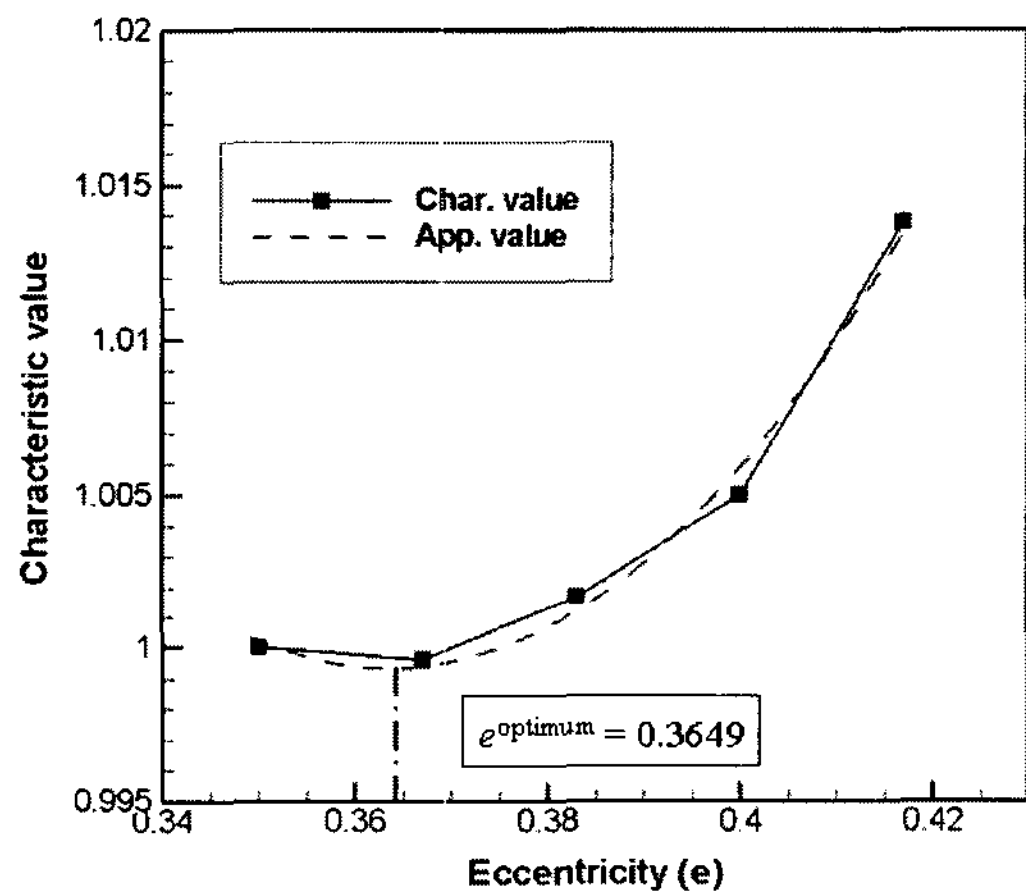
본 연구에서는 유량조절 기능을 하는 버터플라이 밸브의 역할과 역류방지 기능을 하는 체크밸브(check valve)의 역할을 동시에 수행하는 펌프 제어 밸브의 수리적 안정성을 고려한 최적의 편심축을 결정하는 새로운 설계방법을 제안하였다. 유동장 수치해석을 통해 소구경, 대구경 펌프 제어 밸브의 최적 편심축 높이를 결정하기 위하여, 밸브의 입구부와 출구부사이의 압력강하 값과 밸브 디스크부의 편심축에 발생하는 모멘트 값을 이용하여 유동특성을 표현할 수 있는 특성함수를



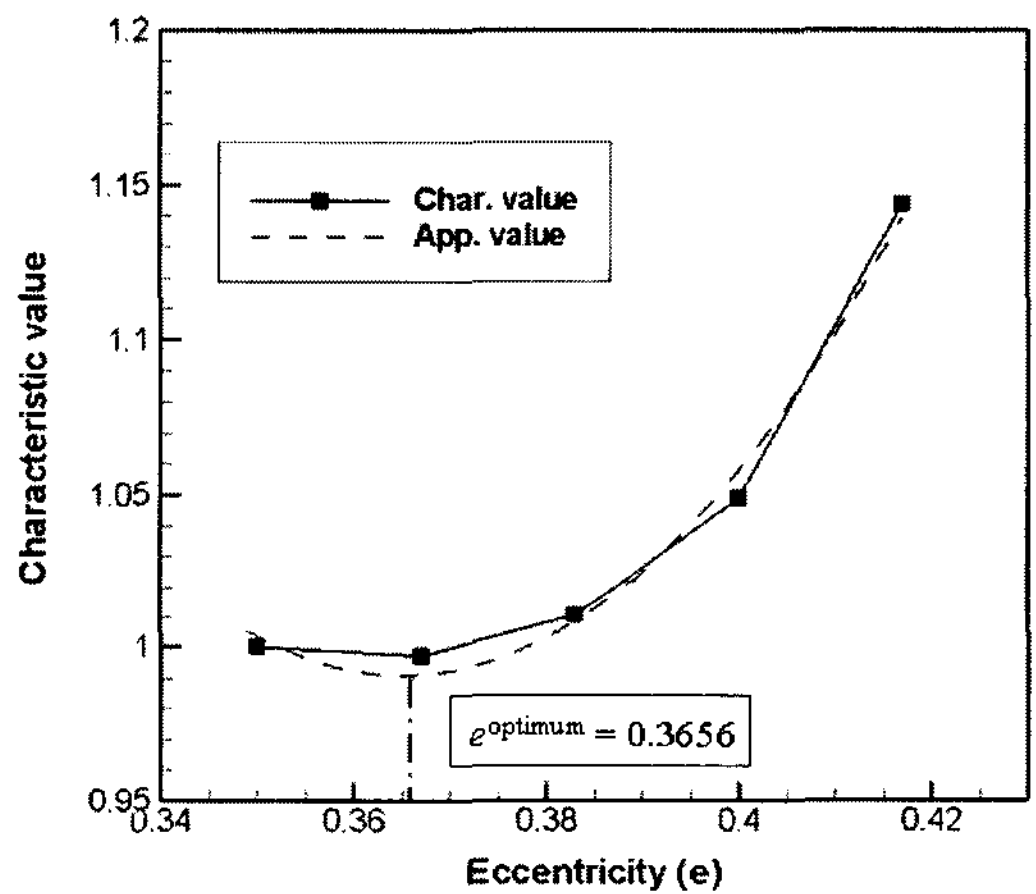
(a) D = 400 mm



(b) D = 1200 mm



(c) D = 2000 mm



(d) D = 3000 mm

Fig. 4 The eccentricity(e) versus characteristic values

구성하였다. 이 특성함수를 이용하여 편심축의 높이를 결정하였고, 이를 통해 기존의 설계안이 매우 안정함을 알 수 있었다. 또한 제안한 설계방법을 이용하면 새로운 형태의 밸브 설계 시 적용하여 편심축의 높이 결정에 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 (주) YH와 2단계 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Skousen, P. L., 2004, "Valve Handbook (2nd ed.)," McGraw-Hill, U.S.A.
- (2) Kimura, T., Tanaka, T., Fujimoto, K. and Ogawa, K., 1995, "Hydrodynamic Characteristics of a Butterfly Valve - Prediction of Pressure Loss Characteristics," ISA Transactions, Vol. 34, pp. 319~326.
- (3) Eom, K., 1988, "Performance of Butterfly Valve as a Flow Controller," ASME Journal of Fluids Eng., Vol. 110, pp. 16~19.

- (4) 윤준용, 이승준, 김승석, 2004, “공동 현상 방지를 위한 버터플라이 밸브의 유동장 해석,” 유체기계 저널, vol. 7, No. 1, pp. 9~16.
- (5) Danbon, F. and Sollic, C., 2000, “Aerodynamic Torque of a Butterfly Valve-Influence of an Elbow on the Time-Mean and Instantaneous Aerodynamic Torque”, ASME Journal of Fluids Eng., Vol. 122, pp. 337~344.
- (6) 박영철, 최종섭, 강진, 2005, “특성함수를 이용한 Butterfly valve의 최적설계,” 한국해양공학회지, 제19권, 제3호, pp. 59~65.
- (7) Dvir, Y., 1997, “Flow Control Devices,” Jordan Jed, U.S.A.
- (8) C.N. Anderson, Valves, in: R.L. Sanks (Ed.), 2006, “Pumping Station Design (3rd ed.),” Butterworth Heinemann, London.
- (9) Kim, R. H. and Huang, C., 1993, “Numerical Simulation Butterfly Valve Fluid Flow,” Proceedings of the FLUENT User’s Group meeting, pp. 296~313.
- (10) FLUENT User’s Guide, 2003, Fluent Inc.
- (11) Vandoormaal, J. P. and Raithby, G. D., 1984, “Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows,” Numerical Heat Transfer, vol. 7, No.2 ,pp. 147~163.
- (12) 한국수자원공사, 1995, “수도권 광역상수도 5단계 사업 실시 설계 보고서”
- (13) Park, G. J., 2008, “Analytic Methods in Design Practice,” Springer, Germany.