2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

밸브 압력강하가 일정한 시스템에서의 밸브 및 원심펌프 속도제어에 대한 해석적 고찰

An Analytical Investigation on the Valve and Centrifugal Pump Speed Control with a Constant Differential Pressure across the Valve

정병렬, 주경인, 이병진, 백세진, 노태선

한국전력기술주식회사

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

밸브에서의 압력강하가 일정하도록 하는 시스템에서의 밸브 개도 및 원심펌프 속도제어 프로그램을 요구되는 공급유량의 함수로 유도하였다. 밸브를 통한 압력강하가 일정하게 발생하도록 공급유량만의 함수로 표현되는 밸브개도 제어 프로그램을 해석적으로 도출하였으며, 이에 대응하는 원심펌프의 공급유량에 따른 속도제어 프로그램을 해석적으로 도출하였다. 이를 통하여 밸브를 통한 압력강하가 일정하도록 하는 제어전략에서는 밸브개도와 펌프속도는 요구되는 공급유량만의 함수로 서로 독립적으로 제어될 수 있음을 이론적으로 확인하였다. 또한 밸브의 압력강하가 일정하도록 하는 시스템에서는 요구되는 공급유량에 따른 원심펌프의 선형적인 속도제어로는 밸브의 압력강하를 일정하게 유지할 없음을 해석적으로 확인하였다.

Abstract

A valve opening and centrifugal pump speed control was investigated analytically in a simple pumping system where the differential pressure across the control valve is maintained constant over the required flow range. The valve control program was derived analytically only as a function of the required flow rate to maintain the constant differential pressure across the valve. The centrifugal pump speed control program was also derived analytically for the required flow rate for the constant differential pressure across the control valve. These derivations theoretically show that the independent control is possible between the valve and pump speed in a system with a constant valve pressure drop. In addition, it was shown that a linear pump speed control is impossible in maintaining the constant valve pressure drop.

1. 서 론

일반적으로 급수 시스템은 저장조, 제어 밸브, 급수 펌프 및 배관 등으로 구성되며 펌프 흡입 압력, 유체의 온도, 고도 압력 및 저장조 압력 변화가 존재한다. 또한 일부 구성 기기들

은 병렬 또는 직렬로 설치되기도 하며 배관이 병렬로 설치되어 하나로 합쳐지는 등 다양한 구성을 갖기도 한다. 이러한 다양한 구성의 급수 시스템에서 요구되는 유량 공급을 위하여 제어 밸브와 급수 펌프의 조합에 대한 제어 프로그램을 선정하게 된다. 이러한 제어 프로그램들은 기기의 건전성 및 안정한 유량 제어 특성이 유지되도록 선정하게 된다.

일반적으로 밸브는 설치되는 펌프의 용량과 계통 수두저항 등을 고려하여 적절한 허용 압력강하를 갖도록 선정되고, 그 허용 압력강하 이하 또는 어느 범위 내에 유지되도록 제어된다. 그러나 이러한 급수 시스템에서 요구유량에 따른 최적의 밸브개도 및 펌프속도 프로그램을 선정하기 어려워 일반적으로 선형적으로 운용한다. 이러한 요구유량에 따른 선형적인 제어 전략은 어떤 요구유량 조건에서 과도한 압력강하가 발생하는 문제점이 있다. 따라서 요구되는 공급유량 전체 범위에 걸쳐서 과도한 압력강하가 발생하지 않도록 하거나, 필요에 의하여 발생되는 압력강하를 일정하게 유지하는 제어 전략이 요구된다.

본 논문에서는 고도 압력 상승 및 온도 변화가 없는 단순 급수 시스템에서 제어 밸브의 압력강하를 일정하게 유지하기 위한 밸브 제어 및 펌프 속도 제어 프로그램을 요구유량의 함수로 해석적으로 유도하였다. 제어밸브의 압력강하를 일정하게 유지하기 위한 밸브의 개도 제어는 원심펌프의 속도제어와 독립적으로 요구되는 공급유량만의 함수로 표현이 가능하며, 또한 이에 따른 원심펌프 속도제어 프로그램을 요구되는 유량만의 함수로 설정이 가능함을 해석적으로 유도하였다. 이와 같이 본 논문에서 유도된 프로그램은 요구되는 유량 범위에 걸쳐서 밸브의 압력강하가 일정하도록 하는 제어전략에 활용될 수 있다.

2. 본 론

2.1 계통 압력 균형식

그림 1 에 나타나 있는 단순 급수 계통에 대한 정상상태에서의 압력 균형식은 다음과 같이 기술된다.

$$P_A + \Delta P_E + \Delta P_P = P_B + \Delta P_V + \Delta P_L \qquad (1)$$

여기서 각 항들은 P_A = 펌프 흡입부 저장조 압력, ΔP_E = 고도 압력 상승, ΔP_P = 펌프 양정, P_B = 펌프 방출부 저장조 압력, ΔP_V = 밸브 압력 강하, ΔP_L = shock loss 를 포함한 배관 압력 강하를 나타내며 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta P_E = rg(z_A - z_B)$$

$$\Delta P_P = f(n, Q)$$

$$\Delta P_V = G\left(\frac{Q}{C_V}\right)^2$$

$$\Delta P_L = Q^2 \sum_j \left(\frac{rK}{2A^2} \right)_j = kQ^2$$

위에서 펌프 양정, ΔP_P는 펌프의 속도(n) 및 유량(Q)의 함수로 표현한 것이고, 요구되는 공급유량 범위에서 유체의 밀도는 일정하다고 가정하였다.

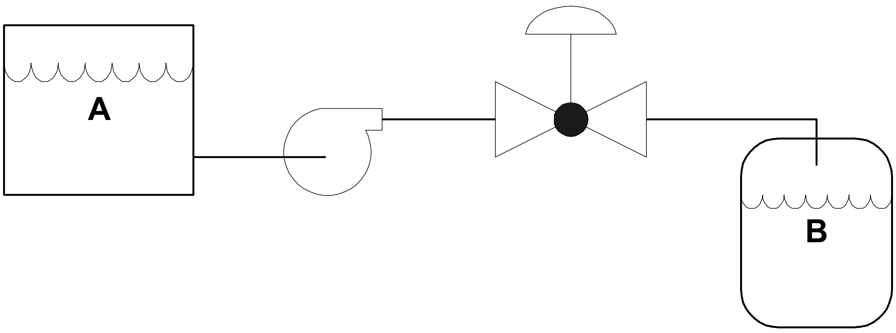

그림 1. 유량 조절 밸브 및 펌프 시스템

그림 1에서 펌프 흡입부 및 방출부 저장조 압력과 고도에 의한 압력 강하 또는 상승은 일정하다고 가정하여 정상상태 압력 균형식에 미분 변화량을 적용하면 다음과 같다.

$$d(\Delta P_P) = d(\Delta P_V) + d(\Delta P_L) \tag{2}$$

위 식의 각 항들의 미분 변화량들은 다음과 같이 기술된다.

펌프 양정 (Pump Developed Head):

$$d(\Delta P_P) = \frac{\partial f}{\partial Q} dQ + \frac{\partial f}{\partial n} dn$$

밸브 압력강하 (Valve Pressure Drop):

$$d(\Delta P_V) = \frac{\partial (\Delta P_V)}{\partial Q} dQ + \frac{\partial (\Delta P_V)}{\partial C_V} dC_V$$

배관 압력강하 (Piping and Shock Loss):

$$d(\Delta P_L) = \frac{\partial (\Delta P_L)}{\partial Q} dQ$$

위의 미분 변화량에 대한 식들을 식 (2)에 대입하여 다시 정리하면 다음과 같이 미분 유량

변화에 따른 시스템 전체의 압력강하에 대한 식을 얻는다.

$$\frac{2G}{C_V^3}\frac{dC_V}{dQ}Q^2 - 2\left(\frac{G}{C_V^2}+k\right)Q + \frac{\partial f}{\partial Q} + \frac{\partial f}{\partial n}\frac{dn}{dQ} = 0 \qquad (3)$$

여기서 밸브 압력강하가 일정하도록 요구되는 유량에 따라 개도를 조절할 수 있다면 밸브 압력강하에 대한 두 개의 항은 사라지고 다음과 같이 배관 손실 및 펌프 특성에 관련된 항으로만 구성된 식을 얻는다.

$$-2kQ + \frac{\partial f}{\partial Q} + \frac{\partial f}{\partial n}\frac{dn}{dQ} = 0 \qquad (4)$$

2.2 밸브제어 프로그램

제어 밸브의 압력강하를 일정하게 유지하는 것은 $d(\Delta P_V) = 0$ 이므로 밸브 압력강하 및 밸브 유량계수 관계식으로부터 유량 변화에 따른 밸브 유량계수 관계식을 유도할 수 있다.

$$\Delta P_V = G\left(\frac{Q}{C_V}\right)^2 = \text{Constant} \rightarrow C_V = kQ \qquad (5)$$

여기서 밸브 유량계수 및 유량은 다음과 같은 범위의 값을 갖는다.

$$C_V = [0,\ C_V^{\max}],\ \ Q = [0,\ Q_{\max}]$$

상수 k 는 어떤 요구유량에서의 밸브의 정격 유량계수에 의하여 결정하거나 밸브가 완전히 개방되었을 때 밸브유량이 최대인 것을 이용하여 결정할 수 있으며, 여기에서는 후자를 이용하여 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$C_V^{\max} = kQ_{\max} \rightarrow k = \frac{C_V^{\max}}{Q_{\max}}$$

일반적으로 밸브 유량계수는 다음과 같이 밸브 개도, z 의 함수로 표현된다.

$$C_V(z) = C_V^{\max} g(z), \quad z = [0,\ 1]$$

밸브유량 계수를 최대 유량계수와의 비, 그리고 유량은 최대유량과의 비로 정의하면 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$c_v(z) = \frac{C_V(z)}{C_V^{\max}} = g(z)\ , \quad z = [0,\ 1], \quad c_v = [0,\ 1], \quad q = [0,\ 1]$$

$$q = \frac{Q}{Q_{\max}}$$

식 (5)를 살펴보면 밸브의 압력강하가 일정하게 유지되는 시스템에서는 요구되는 유량 변화에 따른 밸브 유량계수 변화가 일정하여야 한다. 밸브 제작자가 제공하는 밸브 특성 곡선은 밸브개도에 따른 유량계수를 나타내므로 이로부터 유량에 따른 유량계수 변화를 일정하게 유지할 수 있는 밸브 개도 변화를 구할 수 있다. 다음에서 선형 (linear), 동률 (equal percentage) 그리고 급속개방 (quick open) 특성 밸브에 대하여 수식적으로 근사하여 요구되는 유량에 따른 밸브 개도 변화를 유도하였다.

밸브를 통한 압력강하가 일정하도록 하는 경우 요구유량에 따른 밸브 유량계수의 변화는 다음과 같이 간단하게 유량의 함수로만 표현된다.

$$c_v(q) = q \rightarrow \frac{dc_v}{dq} = 1$$

밸브의 유량계수 제어는 밸브 개도 제어에 의하여 이루어지므로 궁극적으로 요구유량에 따른 밸브 개도 프로그램은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{dz}{dq} = \frac{1}{\frac{dg}{dz}} \qquad (6)$$

그림 2 에 네 가지 밸브 특성 곡선의 전형적인 형태가 나타나 있으며 각 특성 곡선에 대하여 밸브를 통한 압력강하가 일정하도록 만드는 밸브 제어 프로그램을 유도하였다. 이 때 사용된 경계조건은 임의로 다음의 조건을 적용하였다.

$$z(q=0)=0,\quad z(q=1)=1$$

표 1. 밸브 특성곡선에 따른 밸브개도 프로그램

밸브 특성곡선	$c_v(z)$	$\frac{dz}{dq}$	$z(q)$
(1) 선형 특성	z	1	q
(2) 동률 특성 (개도의 2 차함수)	z^2	$\frac{1}{2z}$	$\sqrt{q}$
(3) 동률 특성 (개도의 3 차함수)	z^3	$\frac{1}{3z^2}$	$q^{1/3}$
(4) 급속개방 특성 (개도의 2 차함수)	$1-(z-1)^2$	$\frac{1}{-2(z-1)}$	$1-\sqrt{1-q}$

그림 2 는 표 1 에 나타나 있는 4 가지의 밸브 특성곡선을 나타낸 것이다. 그림 3 은 그림 2 의 각 밸브 특성곡선에 대응하는 밸브 압력강하를 일정하게 유지하기 위한 밸브개도 프로그램을 나타내고 있다.

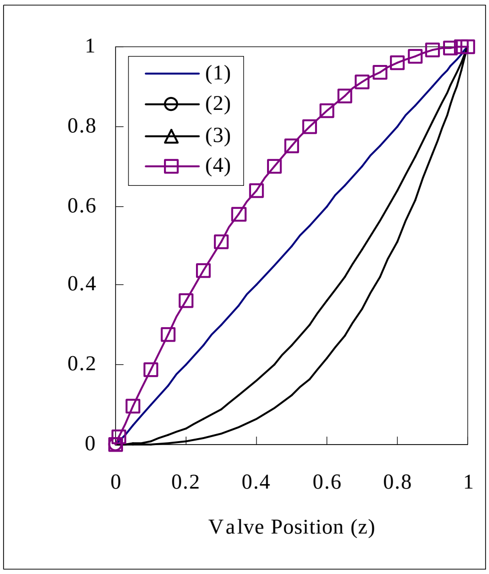

그림 2. 밸브 특성 곡선

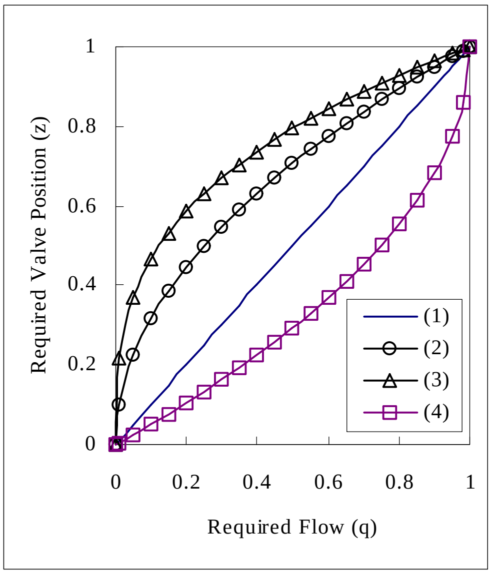

그림 3. 밸브 개도 프로그램

2.3 펌프 속도제어 프로그램

밸브 압력강하가 일정한 시스템에서의 요구유량 변화에 따른 펌프 속도 제어 관계식은 식 (4)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{dn}{dQ} = \frac{2kQ - \frac{\partial f}{\partial Q}}{\frac{\partial f}{\partial n}} \tag{7}$$

이 식을 살펴보면 펌프 속도제어는 밸브의 압력강하를 제외한 배관의 손실 (friction 및 shock loss)과 펌프 특성에 의해서만 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 즉, 밸브 압력강하가 일정하도록 하는 시스템에서 펌프 속도제어는 밸브 제어와는 무관하게 설정될 수 있음을 알 수 있다.

표 2 에 4 가지 경우에 대하여 밸브의 압력강하가 일정한 시스템에서의 펌프 속도 제어 프로그램을 해석적으로 유도하여 나타내었다.

표 2. 펌프 특성 곡선에 따른 펌프 속도 프로그램

	$\frac{\partial f}{\partial Q}$	$\frac{\partial f}{\partial n}$	$\frac{dn}{dQ}$	$n(Q)$
(1)	b	b	$\frac{2kQ-b}{b}$	$\frac{kQ^2-bQ}{b}+d_1$
(2)	$aQ+b$	b	$\frac{(2k-a)Q-b}{b}$	$\frac{\left(k-\frac{a}{2}\right)Q^2-bQ}{b}+d_2$
(3)	b	$an+b$	$\frac{2kQ-b}{an+b}$	$\frac{-b+\sqrt{b^2+2a(kQ^2-bQ)}}{a}+d_3$
(4)	$aQ+b$	$an+b$	$\frac{(2k-a)Q-b}{an+b}$	$\frac{-b+\sqrt{b^2+a\left[(2k-a)Q^2-2bQ\right]}}{a}+d_4$

Note: a, b, a, b = 상수, d_1, d_2, d_3, d_4 = 적분상수

표 2의 요구유량에 따른 속도 관계식에 포함된 적분 상수들은 시스템에서 요구하는 최소 유량 조건에서 최소 펌프속도를 이용하거나 정격 유량 조건에서 정격 펌프속도를 이용하여 결정할 수 있다. 표 2에서 $\frac{\partial f}{\partial Q} = aQ + b$ 및 $\frac{\partial f}{\partial n} = an + b$로 근사하는 경우는 원심펌프의 상사성 원리를 적용한 근사로서 원심 펌프 속도 제어 이해에 매우 적절한 경우이다. (1)과 (2)의 경우와 같은 특성을 갖는 원심펌프는 없으나 펌프 속도 제어에 대한 이해에는 적절한 경우이다. 유도된 펌프속도 제어 프로그램을 살펴보면 어떤 경우에도 밸브 압력강하를 일정하게 유지하는 제어전략에서는 요구유량에 따른 펌프속도 제어프로그램이 선형적인 경우는 없음을 알 수 있다.

다음의 표 3은 근사에 사용된 계수들의 한 예로서 어느 급수 시스템에서 실제로 사용된 펌프특성 자료로부터 근사한 것이다. 동일한 펌프특성 자료에 대하여 4가지 모두의 경우에 대하여 표 3에 나타나 있는 바와 같이 근사를 한 것이다.

표 3. 펌프특성 곡선의 근사식 계수

	$\frac{\partial f}{\partial Q} = aQ + b$		$\frac{\partial f}{\partial n} = an + b$	
	a	b	a	b
(1)	0.0	-0.01886	0.0	0.42257
(2)	-8.40E-07	-0.01004	0.0	0.42257
(3)	0.0	-0.01886	1.68E-04	-0.28853
(4)	-8.40E-07	-0.01004	1.68E-04	-0.28853

위의 표 3의 근사식 계수를 이용한 요구유량에 따른 펌프 속도 프로그램의 예가 그림 4에 나타나 있다. 여기에 사용된 배관의 등가 손실 계수 (k)는 실제 어느 급수 시스템으로부터 평가한 $6.09 \times 10^{-7} \left[\frac{psi}{gpm^2} \right]$을 사용하였다. 그리고 어떤 임의의 요구유량에서 임의의 최소 펌프속도를 적용하여 그린 것이다. 그림 4에 나타나 있듯이 밸브에서 발생하는 압력강하가 일정하도록 하는 제어 전략에서는 펌프속도는 요구유량에 따라 선형적으로 변하는 경우는 나타나지 않았다. 경우 (3)의 경우 선형적인 것처럼 보이지만 표 2의 식에서 알 수 있듯이 선형적인 것은 아니다. 따라서 요구유량에 따른 펌프속도를 단순히 선형적으로 제어할 경우와 비교할 경우에는 여분의 압력상승이 발생하게 되고 이는 제어밸브가 흡수하여야 하는 문제점을 발생할 수 있다.

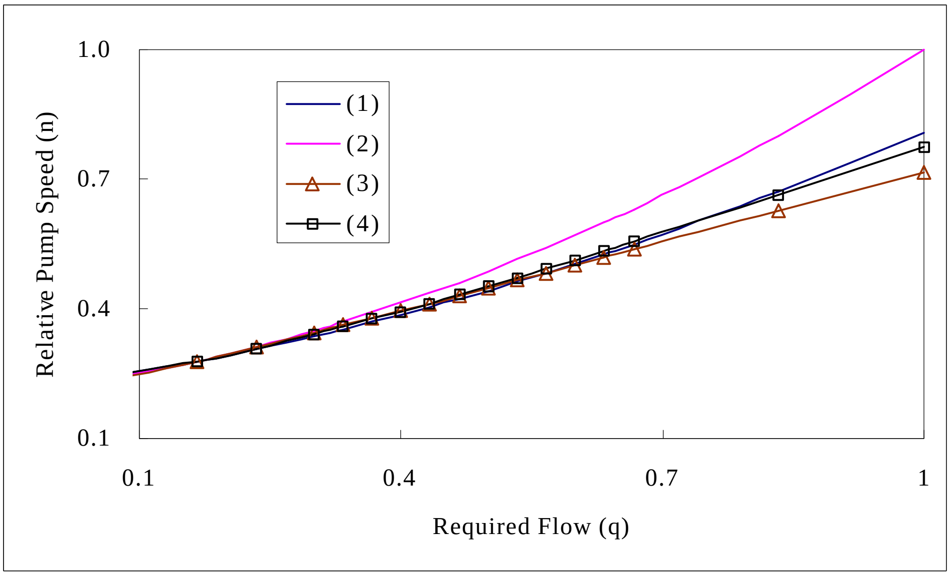

그림 4. 펌프속도 제어 프로그램

배관의 손실계수 (loss coefficient) 자체는 유량에는 무관하나 펌프의 양정은 유량 및 펌프 속도에 의하여 변한다. 실제로 펌프의 특성 곡선은 수식적으로 표현되기 어렵다. 그러나 원심펌프의 경우 펌프 상사성에 의하면 유량은 펌프속도에 직접 비례하고 펌프의 양정은 펌프 속도의 제곱에 비례한다. 따라서 이를 이용하여 일반적으로 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$f(n,Q) = a(Q)n^2 + b(Q)n + c(Q) \tag{8}$$

$$a(Q) = aQ^2 + pQ + u$$

$$b(Q) = bQ^2 + qQ + v$$

$$c(Q) = gQ^2 + rQ + w$$

여기서 $a, b, g, p, q, r, u, v, w$는 상수이다.

이 경우 밸브의 압력강하를 일정하게 유지하기위한 요구유량에 따른 펌프 속도제어 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dn}{dQ} = \frac{2\left[k - \left(an^2 + bn + g\right)\right]Q - \left(pn^2 + qn + r\right)}{2a(Q)n + b(Q)} \tag{9}$$

위식에서 알 수 있듯이 요구유량에 따른 펌프속도의 변화율은 밸브의 개도 또는 유량계수와

는 무관하게 요구유량 및 펌프속도만의 함수로 표현됨을 알 수 있다. 즉, 밸브의 개도를 그를 통한 압력강하가 일정하게 되도록 하는 제어전략에서는 펌프속도 제어는 밸브제어와 무관하게 선정될 수 있음을 의미한다.

3. 결 론

펌프 흡입압력, 저장조 압력, 고도 압력 상승 및 온도 변화가 없는 단순 급수 시스템에서 제어 밸브의 압력강하를 일정하게 유지하기 위한 밸브개도 제어 프로그램과 펌프속도 제어 프로그램을 해석적으로 유도하였다. 제어 밸브의 압력강하를 일정하게 유지하기 위한 밸브 개도 제어는 펌프 속도 제어와는 독립적으로 요구유량의 함수로서 선정이 가능하며, 이에 따른 펌프 속도 제어 프로그램은 펌프 특성 및 배관 손실 등을 포함한 유량만의 함수로서 해석적으로 선정이 가능하였다. 밸브에서의 압력강하를 일정하게 유지하는 제어 전략에서는 요구유량에 따른 펌프 속도 제어는 단순한 선형적인 경우로는 불가능함을 해석적으로 확인하였다. 이는 요구유량에 따른 선형적인 원심펌프 속도제어를 적용할 경우 여분의 압력 강하 또는 상승은 제어 밸브에서 흡수하여야 함을 알 수 있다.

본 논문의 결과는 요구되는 공급유량 전체 범위에서 밸브의 압력강하를 일정 또는 어느 범위 이내로 유지하는 제어전략에 응용할 수 있다. 그러나 대부분의 실제 급수 시스템은 펌프 흡입 압력, 유체의 온도, 고도 압력 및 저장조 압력 변화가 존재한다. 이러한 변화가 존재하는 시스템에서는 펌프속도 제어 프로그램에 미치는 영향을 고려하여야 한다. 그러나 제어밸브의 압력강하를 일정하게 유지하기 위한 밸브 개도제어 프로그램은 이러한 변화와 무관하게 유량만의 함수로서 선정될 수 있다.

참고문헌

[1] L. R. Driskell, *Selection of Control Valves and Other Final Control Devices*, Instrument Society of America, 1982.

[2] L. R. Driskell, *Control-Valve Selection and Sizing*, Instrument Society of America, 1983.

[3] ISA-S75.01-1985, *Flow Equation for Sizing Control Valves*, Instrument Society of America, 1985.

[4] V. L. Streeter and E. B. Wylie, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., 1975.

[5] E. Kreyszig, *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons, Inc., 1979.

[6] I. J. Karassik, W. C. Krutzsch, W. H. Frasser, and J. P. Messina, *Pump Handbook*, 2^{nd} Ed., McGraw-Hill Book Company, 1986.