

압력측정을 이용한 과도기유량의 결정방법에 관한 연구

이 성 래
 건양대학교 기계공학과

A Method for the Determination of Transient Flow Rates
 from Pressure Measurements

Lee, Seong-Rae
 Department of Mechanical Engineering, Keonyang University

A transient hydraulic flow rate computation scheme is described here so that the transient hydraulic flow rate can be determined using the dynamic pressure measurements at the ends of a straight flowline with a dynamic model of the hydraulic line. Simulation results indicate that the method is relatively robust to realistic levels of uncertainties in the fluid properties.

1. 서론

일반 유량계는 순간적인 과도기 유량을 측정할 수 없으며 laser doppler 속도계나 ultrasonic 유량계를 사 용해야지만 가능하나 값이 비싸고 모두 설치 부위에서의 유 량측정만이 가능하다. 만일 관유동에 관한 동특성이 정확하 게 묘사될 수 있다면 즉 수학적 식으로 표현될 수 있다면 임의의 두 점에서 측정된 정확한 압력값들은 두 점 사이에 있는 모든 곳에서의 압력값이나 유량값을 구할 수 있게 한 다. 과도기 유량을 계산하게 된 동기는 유압회로 내에 설치 된 초고속 작동 유압휴즈[1]의 동특성을 연구하는 과정에서 관파괴를 대신 흉내내는 솔레노이드 밸브에 대한 정확한 열 림특성을 알아야 했기 때문이다.

직경이 일정한 긴 관 내부에 고압의 작동유를 채워 놓고 관 끝에 설치된 솔레노이드밸브를 순간적으로 열면 관 내부의 압력은 순식간에 영으로 감소한다. 이때 관 양단에 서 측정된 압력값을 이용하여 관 내부의 모든 위치에서의 과도기 유량을 계산할 수 있으며 또한 오리피스 유량식을

이용하여 솔레노이드밸브의 오리피스 면적이 시간에 따라 어떻게 변하는지 알 수 있다. 이렇게 계산된 밸브오리피스 의 개구면적 변화곡선은 실제 개구면적 변화곡선과 비교할 수 있으며 두 곡선의 일치 정도에 따라 압력측정을 이용한 과도기 유량의 결정방법의 정확성을 증명할 수 있다. 이러 한 일련의 과정은 세 단계로 구분되는데, 첫째 유압관 유동 에 대한 동특성식이 정확히 묘사되어야 하며 측정된 압력은 동특성식을 풀기 위한 경계조건이라 할 수 있다. 둘째 유압 회로의 유압관의 양단에 설치된 압력계로써 압력을 측정한 다. 물론 압력계의 응답성과 정확성이 요구되며 그 특성이 동일해야 한다. 셋째 유압관 유동에 대한 동특성식을 정성 적으로 풀 수 없으므로 수치적으로 풀 수 있는 프로그램을 작성하여 과도기 유량을 계산한다.

2. 관유동에 대한 수학적 모델

유압회로 내의 관내 유동은 참고문헌[2]를 참고하 여 해석하였다. 연속 방정식(continuity equation)과 운동 방정식(Navier-Stokes equation)을 이용하여 관 내의 유량, Q와 압력, P에 대한 관계식이 얻어진다. 여기서 관유동은 층류, 일차 유동이며 온도 변화는 없다고 가정하였다.

$$sP(x, s) = -cZ_c \frac{dQ(x, s)}{dx} \tag{2.1}$$

$$sZ_c Q(x, s) = -\frac{c}{N(s)} \frac{dP(x, s)}{dx} \tag{2.2}$$

$$\text{여기서 } c = \sqrt{\beta/\rho} = \text{유체 내에서의 음속} \tag{2.3}$$

$$\beta = \text{유체 체적계수}$$

ρ = 유체 밀도

$$Z_c = \rho c/A = \text{관유동 특성 임피던스} \quad (2.4)$$

A = 관 내부 단면적

$$N(s) = \frac{\alpha}{s} + 1 + \frac{0.1515}{1 + 0.303(s/\alpha)} + \frac{0.1620}{1 + 0.04(s/\alpha)} + \frac{0.020}{1 + 0.001(s/\alpha)} \quad (2.5)$$

$$\alpha = 32\nu/D^2 = \text{점성인자(viscosity factor)} \quad (2.6)$$

여기서 ν 는 동점성계수이고 D는 유관의 내부직경이다. (2.1)식과 (2.2)식은 주어진 길이의 관에서 압력 또는 유량에 대한 두 개의 경계조건이 주어지면 나머지 두 개의 압력 또는 유량에 대해 풀 수 있으나 그것은 주파수 영역에서의 해이며 시간영역에서의 해로 역변환시키는 것은 매우 어렵다. 따라서 그림 2.1과 같이 관을 적당한 길이, Δx 로 나누어서 그 관요소 내에서는 모든 변수값이 일정하다(uniform)고 가정한다. (2.1)식과 (2.2)식은 다음의 (2.7)식과 (2.8)식의 상미분방정식으로 바뀐다.

$$sP_k(s) = \frac{cZ_c}{\Delta x} (Q_{k-1}(s) - Q_k(s)) \quad (2.7)$$

$$sZ_c Q_k(s) = \frac{c}{N(s)\Delta x} (P_k - P_{k+1}) \quad (2.8)$$

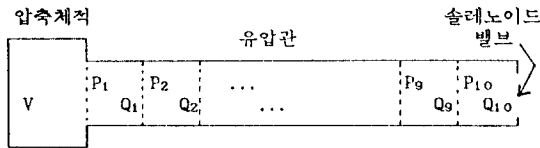


그림 2.1 과도기 압력 발생장치
Fig 2.1 Test circuit for transient pressure generation

관요소 길이는 관 내에서 발생하는 압력변화의 주파수 성분 중 가장 큰 주파수를 가진 압력과 파장의 십분의 일 이하로 한다[3]. 식 (2.7)과 식 (2.8)은 인접한 관유동 요소와 쉽게 연결할 수 있다. 식 (2.5)는 관내유동에서 압력이나 유량 변화의 주파수 성분 중 가장 큰 주파수 w 가 $0 < w < 300\alpha$ 일 때 성립하며 원래 식은 차수가 0인 베셀함수와

차수가 2인 베셀함수의 비로 표시된다[2]. (2.7)식과 (2.8)식은 그림 2.2와 같은 블록선도로 표시되어 시뮬레이션을 수행하기가 편리하다. 따라서 k번째 관요소의 경우 k-1번째 관요소의 유량 Q_{k-1} 과 k+1번째 관요소의 압력 P_{k+1} 이 입력변수로 주어지며 P_k 와 Q_k 는 출력변수라 할 수 있다.

그림 2.1에서 솔레노이드밸브가 설치된 부위의 10번째 관요소에 대한 블록선도가 그림 2.3에 나타나 있으며 입력변수는 P_{10} 과 Q_9 이며 출력변수는 Q_{10} 으로서 밸브를 통과하는 유량이다. 그림 2.4는 그림 2.1의 압축체적에 인접한 관요소에 대한 블록선도로서 입력변수는 P_1 , P_2 이며 출력변수는 Q_1 이다.

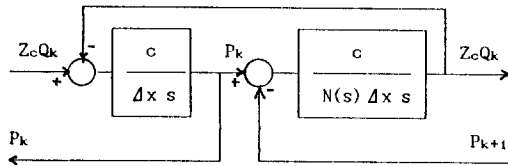


그림 2.2 내부에 위치한 관의 유동에 대한 블록선도
Fig 2.2 Block diagram of internal line segment dynamics

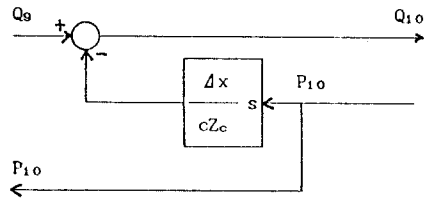


그림 2.3 밸브에 인접한 관의 유동에 대한 블록선도
Fig 2.3 Block diagram of line segment dynamics near the solenoid valve

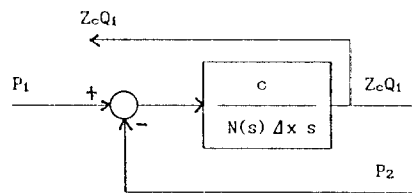


그림 2.4 압축체적에 인접한 관의 유동에 대한 블록선도
Fig 2.4 Block diagram of line segment dynamics near the pressurized volume

첫번째 관요소에 해당하는 그림 2.4 의 블록선도, 두번째에서 아홉번째까지의 관요소에 해당하는 그림 2.2 의 블록선도와, 그리고 열번째 관요소에 해당하는 그림 2.3의 블록선도를 연결할 경우 입력변수는 P_1, P_{10} 이며 그외의 변수는 모두 출력변수라 할 수 있다.

3. 과도기 압력의 발생 및 측정

그림 2.1에 표시는 안되어 있지만 수동펌프를 이용하여 원하는 압력까지 상승시킬 수 있으며 이 때 관 내의 압력은 모두 같다. 그리고 오른쪽 끝에 설치된 솔레노이드 밸브를 순간적으로 열리게 하면 관 내부의 압력은 빠르게 강하되면서 변화할 것이다. 이러한 압력변화는 디지털 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 얻어질 수 있으며 시뮬레이션에 사용된 각종 상수값은 다음과 같다.

유체점성계수 $\mu = 5.976 \times 10^{-6}$ lbf-sec/inch²

유체밀도 $\rho = 8.16 \times 10^{-5}$ lbf-sec²/inch⁴

유체 체적계수 $\beta = 10^5$ psi

압축체적 $V = 100$ inch³

관 전체길이 40 inch, 관 요소길이 4 inch

관 내부직경 0.4 inch

적분방법 Runge-Kutta 4th order

적분간격 5×10^{-6} 초

프린트 간격 10^{-4} 초, 시뮬레이션 시간 0.01 초

그리고 솔레노이드밸브의 열림특성은 0 초에서 0.005 초까지는 오리피스 면적이 0 에서 0.02 inch² 으로 선형적으로 증가하며 0.005 초 이후에는 오리피스 면적이 0.02 inch² 을 계속 유지한다. 그림 3.1 과 그림 3.2 는 그림 2.1 의 첫번째 와 열번째의 관요소에 대한 압력과 유량을 각각 나타낸다. 그림 3.1 에서 밸브인접부위의 압력은 초기압력 1000 psi 에서 550 psi 까지 급격히 떨어지며 압축체적 부위의 압력은 약 0.002 초 이후부터 서서히 감소한다. 그러나 0.007 초 후부터는 두 지점의 압력차가 매우 작다는 것을 알 수 있다. 물론 유압관 내의 압력변화는 여러 가지 실험조건에 따라 다르다. 즉 압축체적의 양, 압축체적 대신에 축압기를 사용할 경우, 솔레노이드밸브의 열림특성, 압축체적과 솔레노이드 밸브 사이의 거리, 작동유 특성상수 등에 크게 좌우될 것이다. 그러나 가장 중요한 것은 관 양

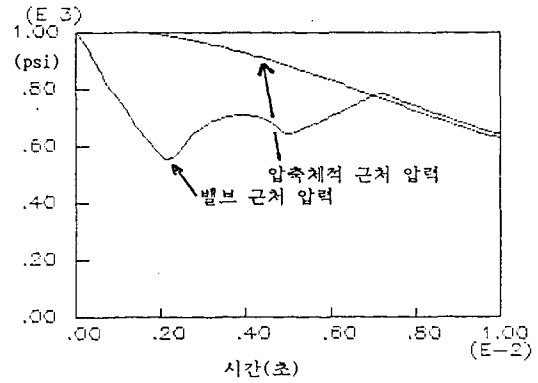


그림 3.1 밸브의 급속열림에 의해 발생하는 과도기압력
Fig 3.1 Simulated pressure at the ends of the flowline

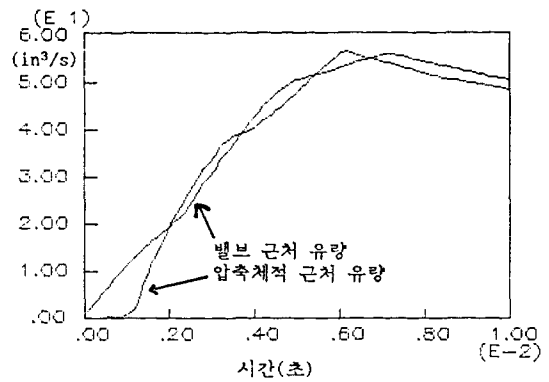


그림 3.2 밸브의 급속열림에 의해 발생하는 과도기유량
Fig 3.2 Simulated flow rate at the ends of the flowline

단에서의 압력을 측정하는 압력계의 특성이 동일하면서 정확해야 한다. 실제적으로 주파수 대역이 0.0016 Hz - 10 kHz 인 피에조타입의 압력계를 사용하는 것을 권장한다. 아울러 압력데이터의 기록장치는 적어도 0.1 밀리초 이하의 간격으로 데이터를 받을 수 있어야 한다.

4. 과도기 유량의 계산 및 결과

관 양단에서 측정된 압력 P_1, P_{10} 을 경계조건으로 하고 주어진 초기조건 즉 시간이 0 일 때 관 내에서의 모든 압력이 1000 psi 인 것을 이용하여 시뮬레이션을 수행한다. 이 때 시뮬레이션에 의해 P_2 에서 P_{10} 까지 그리고 Q_1 에

서 Q_{10} 까지를 구할 수 있다. 또한 식(4.1)에 의해 솔레노이드 밸브의 열림특성을 구할 수 있다.

$$a(t) = \frac{Q_{10}}{\sqrt{C_d \frac{2}{\rho} P_{10}}} \quad (4.1)$$

시뮬레이션에 사용되는 작동유에 대한 상수값, 적분 간격 등은 압력발생시의 시뮬레이션 조건과 같다. 그림 4.1은 그림 3.1에 나타난 관 양단의 압력을 입력으로 하여 관 양단에서의 과도기 유량을 구한 것으로서 그림 3.2에 나타난 원래의 과도기 유량과 잘 일치한다. 그리고 그림 4.2는 솔레노이드밸브의 개구면적을 구한 것으로서 원래 개구면적 변화와 거의 같다는 것을 알 수 있다. 이처럼 산출된 유량이나 밸브 개구면적이 실제값과 잘 일치하는 것은 산출당시 실제 시스템 상수값을 그대로 사용했기 때문이다.

그러나 현실적으로 시스템 상수값을 정확히 알 수가 없으므로 상수값에는 반드시 오차가 포함되어 정확한 과도기 유량의 산출에 나쁜 영향을 끼칠 것이다. 그림 4.3은 그림 3.1에 나타난 압력을 입력변수로 하되 작동유의 점성계수를 실제보다 10% 크게 적용했을 때의 밸브 개구면적 변화를 보여준다. 비교의 편의상 과도기 유량의 비교 대신에 밸브개구면적의 변화를 비교한다. 원래 개구면적과 산출된 개구면적은 거의 비슷함을 알 수 있다. 그림 4.4는 작동유의 밀도를 실제값보다 10% 크게 적용했을 때의 밸브개구면적의 변화를 보여준다. 역시 산출된 개구면적은 원래의 면적 변화와 비슷함을 알 수 있다. 그림 4.5는 작동유의 체적탄성계수를 실제보다 10% 크게 했을 때의 결과를 보여준다. 원래의 개구면적과 산출된 값은 비교적 잘 일치하나 점성계수 값의 10% 오차에 따르는 개구면적산출 정확성 보다는 약간 떨어진다.

실질적으로 유체의 점성계수나 밀도는 비교적 정확하게 알 수 있으나 체적탄성계수의 경우에는 작동유에 포함된 공기의 양에 따라 매우 크게 변하므로 체적탄성계수 값이 실제보다 50% 크게 또는 50% 작게 선정되었을 때 개구면적 산출의 정확성에 끼치는 영향을 조사한다. 그림 4.6은 체적계수값이 실제보다 50% 클 때의 산출된 면적을 보여주며 그림 4.5에 비해 오차가 증가했음을 알 수 있다. 그림 4.7은 체적계수값이 실제보다 50% 작을 때의 결과로서 오차가 매우 크다는 것을 알 수 있다.

관 양단에 설치된 압력계의 상대적인 측정오차는 유량계산의 정확성에 큰 영향을 끼칠 것이 예상되며 솔레노이드밸브 인접부위의 압력계가 실제값보다 10% 크게 측정할 경우 산출된, 개구면적변화가 그림 4.8에 나타나 있다. 원래 개구면적과 산출된 개구면적에는 비교적 큰 오차가 있음을 알 수 있다.

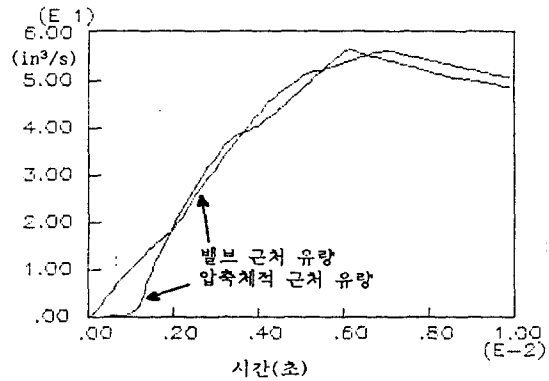


그림 4.1 산출된 과도기유량
Fig 4.1 Computed flow rate

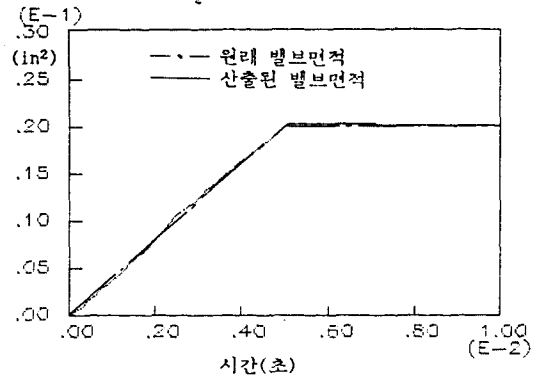


그림 4.2 산출된 밸브열림면적과 원래의 밸브열림면적
Fig 4.2 Computed and original valve orifices area

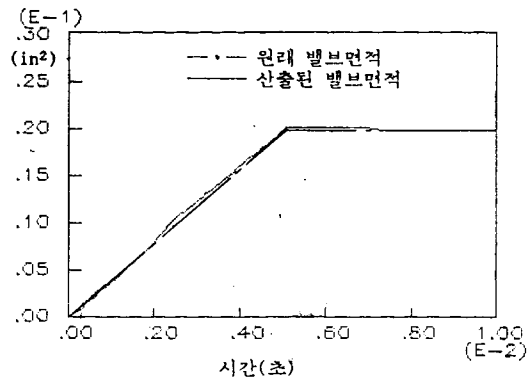


그림 4.3 점성계수 오차가 +10% 인 경우의 밸브열림면적
Fig 4.3 Computed and original valve orifices area
+10% error in viscosity

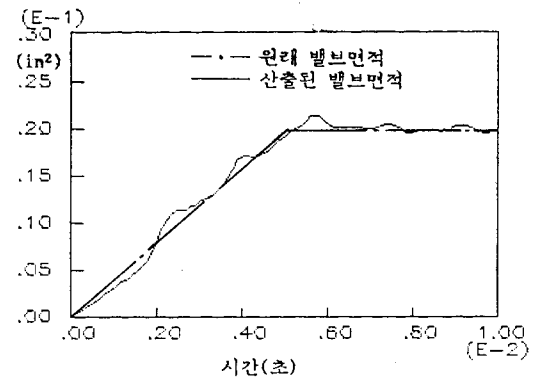


그림 4.6 체적계수 오차가 +50% 인 경우의 밸브열림면적
Fig 4.6 Computed and original valve orifices area
+50% error in bulk modulus

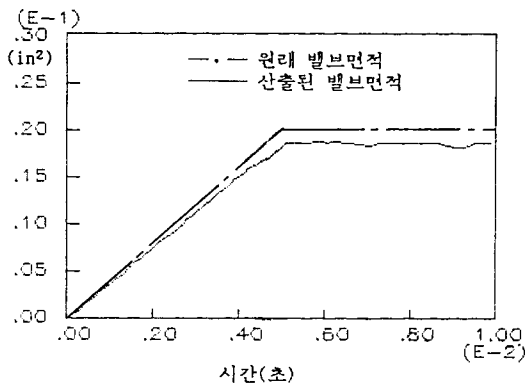


그림 4.4 유체밀도 오차가 +10% 인 경우의 밸브열림면적
Fig 4.4 Computed and original valve orifices area
+10% error in density

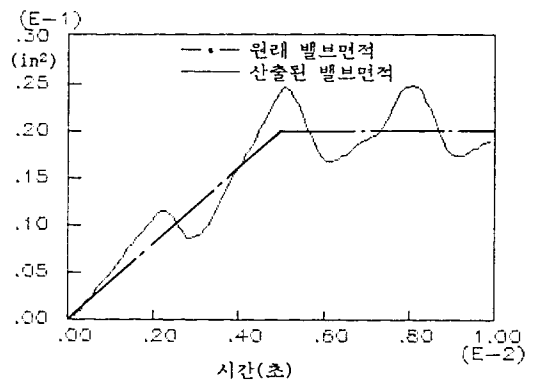


그림 4.7 체적계수 오차가 -50% 인 경우의 밸브열림면적
Fig 4.7 Computed and original valve orifices area
-50% error in bulk modulus

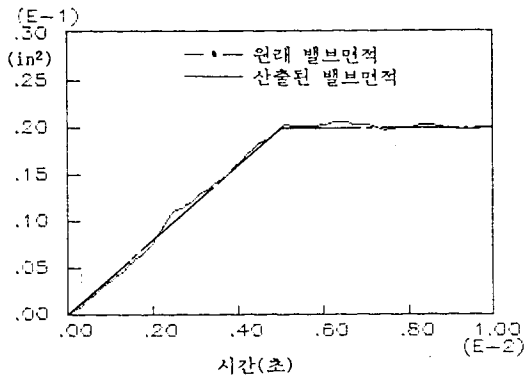


그림 4.5 체적계수 오차가 +10% 인 경우의 밸브열림면적
Fig 4.5 Computed and original valve orifices area
+10% error in bulk modulus

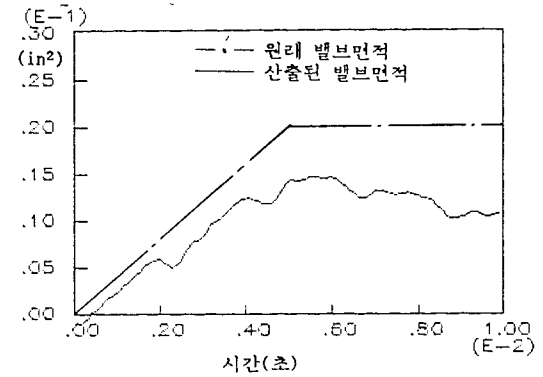


그림 4.8 밸브부위의 압력측정 오차가 +10% 인 경우의 밸브 열림면적
Fig 4.8 Computed and original valve orifices area
+10% mismatch in pressure transducer gain

5. 결론

유압관의 양단에서 압력을 측정하여 과도기유량을 산출하는 방법을 제시하였다. 이러한 방법은 매우 빠르게 열리는 밸브의 얼림특성을 구하는데 유효하게 이용될 수 있다. 이러한 유량계산에서 정확한 결과를 얻기 위해서는 작동유의 체적계수값을 비교적 정확히 알아야 하며 또한 응답성과 정확성이 좋은 압력계를 사용해야한다. 물론 이러한 요구조건은 그렇게 까다로운 것은 아니다.

시뮬레이션에서 과도기유량의 산출 방법이 비교적 강건하고 유효하게 사용될 가능성이 있다는 것이 시뮬레이션에 의해 증명되었다. 물론 실험적으로 측정된 유량이나 측정된 밸브의 개구면적변화특성을 시뮬레이션에 의해 산출된 값과 직접 비교하여 유량계산방법의 정확성과 유효성이 증명되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] 이 성래, "고성능 유압휴즈의 특성에 관한 연구", 1991 한국자동제어 학술회의 논문집, 제 1권, 939-944 쪽, 1991.
- [2] T.J. Viersma, "Analysis, Synthesis and Design of Hydraulic Servosystems and Pipelines," Elsevier Scientific Publishing Company, 1980.
- [3] E.O. Doebelin, "System Modeling and Response, Theoretical and Experimental Approaches," John Wiley and Sons Inc., New York, 1980.