

전자기유량계의 개발 및 신호 특성에 관한 연구

임기원*·김창호**

A study on the development of an electromagnetic flowmeter and the characterization of flow signal

Ki Won Lim*, Chang Ho Kim**

Key Words : Electromagnetic flowmeter(전자기유량계), Calibration(교정), Magnetohydrodynamic(전자유체역학)

Abstract

An electromagnetic flowmeter(EMF) was developed and its characteristics were compared with a commercial EMF. The measuring tube of the EMF was basically designed as 100 mm diameter. A signal processing circuit was also developed for generating the magnetic field and converting the flow signal to flowrate and flow quantity. To obtain a more stable and reliable flow signal, the double magnetizing frequency was adopted for magnetizing the coil of the EMF. For the characterization of EMF, the uncertainty of calibrator was estimated within $\pm 0.5\%$, the method of estimation was in accordance with the ISO 17025 recommendation.

It was found that the flow signals between the electrodes were about $\pm 60 - \pm 300\mu V$, which were sufficient for the discrimination of the flowmeter and protecting the noise. The test result against the calibrator showed the good linearity in the range of $3 m^3/h$ and $70 m^3/h$. A commercialized design of the EMF will be technically more competitive in domestic and foreign market.

1. 서론

전자기유량계(electromagnetic flowmeter)는 패러데이 유도법칙(Faraday induction law)을 원리로 유량을 측정하는 유량계로서 내부에 가동부가 없어 관로의 손실이 적고 이물질이 통과해도 무리 없이 측정할 수 있는 장점과 대구경 관로의 유량 측정에 유리하다. 활용범위는 전도성 유체(electrically conducting fluid) 즉 수용성 유체를 측정하며 상하수도, 폐수, 우유, 맥주 등을 측정에 활용된다. 정확도에 있어서도 상대적으로 높은 편이며 약 500억원의 국내 시장과 20억불의 세계 시장에서 20% 이상의 점유율을 보이고 있으며 앞으로 계속 높아질 것으로 예상되고 있다.

국내의 전자기유량계 개발을 위한 노력은 일부 기업에서 시도하였으나 정확도나 신뢰도에 있어서 시장에서 신뢰를 얻지 못하는 것이 현실이다. 이는 측정원리에 대한 이해가 부족한 상태에서 모방의 단계를 벗어나지 못해 설계기술이 빈약하여 측정정확도 향상에 한계가 있었다.

본 연구는 유량측정전문 벤처 기업인 (주) MaxMet가 한국표준과학연구원에 개발을 의뢰하게 연구를 수행하게 되었으며 개발과정의 경험과 결과를 정리한 것이다. 연구는 측정관과 유량신호를 처리하는 회로의 개발로 나누어 진행되었다.

연구의 결과로 기본적인 설계 도면이 완성되었으며 앞으로는 (주)MaxMet의 기술력으로 유량계의 다양한 기능을 첨가할 예정이다. 즉 측정신호 데이터의 통신 기능의 부가와 측정정확도를 높이

는 연구를 계속하여 시장에서 기술 경쟁력을 강화시킬 것이다.

2. 전자기유량계의 원리 및 신호 특성

전자기유량계의 유량측정원리는 fig. 1과 같이 자기장(magnetic field)이 작용하는 관로 내부에 유체가 유동하면 전극(electrode)에 유체의 속도에 비례하는 전압 즉 유량신호(flow signal)가 패러데이 법칙에 의해 전극에 유도한다. 일반적으로 전극에 유도되는 전압 ϕ_e 는 자속밀도(magnetic flux density)의 크기 B_0 , 전극간의 간격 D 및 유체의 평균유속(average velocity) w_0 에 비례하는 전압 - 즉 유량 신호가 유도되며 식 (1)과 같다.

$$\phi_e = k \cdot B_0 \cdot w_0 \cdot D \quad (1)$$

유량신호의 크기는 식(1)과 같이 표현할 수 있으나 신호의 변환 과정에서 발생하는 비선형적인 요소로 인하여 교정(calibration)을 통하여 비례상수 k 를 조정하여 전극간의 전압을 유량신호로 정의하여 사용하게 된다.

1954년 Shercliff⁽¹⁾가 전자기유량계의 유량신호 해석에 가중함수(weight function)개념을 도입한 이래 연구자들이 이 방법을 이용하여 유량계의 특성을 개선하기 위해 연구하였다. 특히 전자기유량계는 측정원리에 의해 유량계 내부의 속도분포에 영향-설치효과(installation effect)를 가지므로 이를 개선하기 위한 연구들이 수행되기도 하였다.^(2,3) 그러나 설치효과에 대한 근본적인 해결책은

* 한국표준과학연구원 유체유동그룹 kwlim@kriss.re.kr

** (주) MaxMet, ceo@MaxMet.com

제시하지 못하고 있으며 측정정확도 향상을 위한 설계 방법으로 가중함수의 개념이 적용되고 있다.

전자기유량계의 지배방정식은 볼테지(voltage)방정식으로 표현되며 전극면의 전위의 분포 ϕ 는 속도 \vec{u} 와 자속밀도의 크기의 \vec{B} 함수로서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.^(1,4)

$$\nabla^2 \phi = \nabla \cdot (\vec{u} \times \vec{B}) \quad (2)$$

2차원인 경우에 u_z 의 속도만 존재하고 B_z 이 일정하다고 가정하면 해를 구할 수 있다.⁽⁴⁾ 전극사이의 유량신호는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_e = \frac{2}{\pi R} \int \int (B_y W_x - B_x W_y) u_z dx dy \quad (3)$$

여기에서 W_x, W_y 는 가중함수이며 식 (4)와 같이 표현된다.

$$W_x = \frac{R^2(R^2 + y^2 - x^2)}{R^4 + 2R^2(y^2 - x^2) + (x^2 + y^2)^2} \quad (4)$$

$$W_y = \frac{2R^2xy}{R^4 + 2R^2(y^2 - x^2) + (x^2 + y^2)^2}$$

가중함수는 fig. 2와 같이 전극의 평면에 나타낼 수 있으며 자속밀도와 속도성분의 크기가 전극간의 전압 차에 기여하는 정도를 나타낸다. 즉 가중함수의 크기가 큰 부분의 속도와 자속밀도가 크면 전극간의 전압 차에 기여하는 정도가 크고, 작으면 상대적으로 기여도가 작은 것을 의미한다.

Fig. 2에서 W_x 는 전극의 부근에서 가중함수값이 가장 큰 ∞ 으로서 특이점(singular point)을 보이고 있으며 일반적으로 코일 부근에서 상대적으로 작은 값을 가지게 된다. W_y 는 분포가 다르며 전극 부근에서 최대값을 가지고 마찬가지로 전극 부근에서 특이점을 가진다. 또 원점에 대칭적이며 전극과 자석을 잇는 축에서 부호가 바뀌게 된다.

따라서 전자기유량계를 통과하는 유속의 분포가 충분히 발달한 속도 분포를 가질 때 측정값과 상류의 유동조건에 의해 유속 분포가 찌그러짐(distortion)이 발생하면 측정값이 달라지게 된다. 그런데 코일의 위치가 (0, R, 0), (0, R, 0)이므로 자기장은 y 축방향의 자속밀도가 상대적으로 크고 측정의 결과에서도 이를 확인할 수 있었다.⁽⁵⁾ 따라서 유량신호에 미치는 영향은 식 (3)에서 $B_y W_x$ 의 크기가 상대적으로 크다. 그리고 W_y 는 신호의 크기에 미치는 영향이 상대적으로 작고 $B_x W_y$ 값은 유량신호의 크기를 감소시키는 방향으로 작용하게 된다. 즉 전자기유량계에서는 가능한 유량신호를 크게하는 것이 중요하므로 코일의 설계에서는 이점을 고려하여야 한다.

3. 설계 및 제작

Fig. 3은 개발된 전자기유량계의 기본 구성도로서 측정관과 신호처리 회로로 구성되어 있다. 측정관에는 자기장을 발생시키는 코일(전자석)과 전극이 설치되어 있고 신호의 크기를 최대화 하기 위해 서로 직각으로 설치되어 있다. 자기장을 발생시키기 위해 코

일을 사용하였고 크기는 적절한 신호가 발생할 수 있도록 회전수와 직경을 선택하였다.

전극은 유량신호를 측정하는 부분으로 유체와 직접 접촉하므로

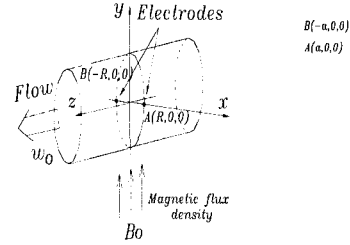


Fig. 1 The principle of an electromagnetic flowmeter

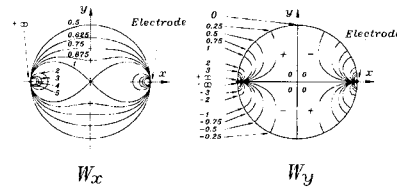


Fig. 2 The weight functions

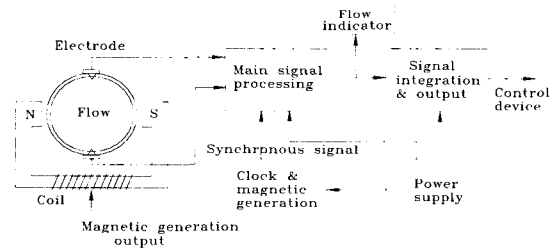


Fig. 3 Block diagram of developed electromagnetic flowmeter

부식을 방지할 수 있는 재질로 선택하였고 절연과 누설을 방지하는 기능을 동시에 수행하도록 설계하였다. 신호처리회로에는 전자석을 주기적인 자화(magnetizing)하기 위한 회로와 이것과 동기화된 주신호 처리회로(main signal processor)가 있다.

즉 주기적으로 자화되는 시간동안 유량신호를 측정해야 하므로 서로 동기화(synchronized) 되어야 한다. 또 주신호 처리회로에서는 미약한 유량신호를 증폭과 정류의 과정을 거쳐서 보다 안정된 구형과 형태로 변환하여 적산회로에 전송하게 된다. 적산회로(signal intergration & output)에서는 주 신호처리부에서 처리된 유량 신호를 적산하여 유동량을 표시하거나 유동율을 표시창에 표시하게 된다.

3.1 측정관의 구조

전자기유량계의 측정관은 측정부의 몸체, 전극과 코일로 구성되어 있다. 측정관 설계는 측정관과 전극의 재질의 선택, 절연과 누설방지를 위한 설계 및 코일의 설계가 중요한 요소가 된다.

측정관은 코일로부터 발생하는 자기장이 통과하여 유동하는 유체에 작용하도록 해야한다. 따라서 측정관은 자기장이 작용할 때 자기장이 통과하고 자기장이 제거되었을 때 잔류자기가 없어야 한다. 즉 전자기 유량계의 유량신호는 자기장의 세기에 비례하기 때문 측정관에 잔류자기가 남아 있으면 유량신호가 시간이 지남에 따라 신호가 변하게 되므로 측정관의 재질은 비자성체로 선택하였다. 측정관의 크기는 100 mm이며 유동하는 액체와 절연이 되어야 하므로 라이닝(lining)은 가공이 비교적 쉬운 베클라이트를 사용하였다.

Fig. 4은 개발한 측정관의 사진을 나타내는 것으로 측정관의 외부에 전극과 코일이 서로 직각으로 장착되어 있다. 코일은 유체가 통과하는 측정관 내부에 자기장이 최대 200 gauss가 되도록 설계하여 회전수가 800 회(turn)가 되도록 하였다.

Fig. 5는 전극의 상세 도면으로 전극은 측정관의 몸체와 절연되어 있다. 측정관의 내부의 라이닝을 통과하여 유체와 직접 접촉되어 있고 절연체로 측정관의 몸체와 절연되어 안정된 신호를 얻도록하였다. 전극은 저항이 적은 재질과 유체의 접촉부분은 부식에 강한 재질을 선택하였다. 또 전극의 재질은 자기장의 세기에 영향을 미치지 않아야하므로 비자성체의 재질을 선택하였다.

3.2 신호처리회로의 설계

Fig. 3에서와 같이 신호처리 회로는 주 신호처리부, 자기장 발생회로, 적산출력부 및 전원회로로 구성되어 있다.

전극에서 검출된 유량신호는 크기가 상대적으로 작아서 주위의 자기장이나 전기회로의 영향에 매우 민감하다. 따라서 두 전극으로부터 신호선이 끌고루 자기장의 영향을 받아 절대적인 크기의 변화가 없도록 한다. 신호처리회로와 측정관은 코일의 자화를 위한 선과 전극의 유량신호를 검출하는 신호선과 연결되어 있다.

Fig. 6은 주 신호 처리회로의 block diagram을 나타내는 것으로 전극으로부터 발생하는 전압신호는 $\pm 60 - \pm 300\mu V$ 로 상대적으로 크기가 작아 노이즈에 취약한 편이다. 특히 전원공급장치로부터 발생하는 60 Hz의 노이즈의 영향을 많아 노이즈 필터(noise filter)에서는 능동 필터(active filter)로서 임피던스(impedence)를 낮추도록 설계하였다. 그리고 전극이 접지(ground)에 대해 평형 및 floating 되어 있으므로 차동증폭기(differential amplifier) 이용하여 증폭하고 노이즈가 저감되도록 설계하였다.

한편 유동으로부터 발생한 미약한 신호를 유량의 단위로 정의하기 위해 k 값을 조정해야 하는데 전 신호처리회로에서 먼저 이득(gain)을 조정할 필요가 있다. 따라서 전극으로부터 신호를 차단하고 참고 신호(reference signal)를 입력하여 조정을 하도록 설계하였다. 즉 점퍼를 이용하여 1차로 x1, x2, x4, x8 4가지의 이득을 조정할 수 있도록 설계하였다.

2차증폭과 level 제어회로에서는 점퍼(jumper)를 조합하여 이득의 크기를 세밀하게 조정할 수 있으며 1차증폭에서 조정이 불가능한 범위의 조정하도록 하였다. 출력 및 안정화회로에서는 2차증폭 회로의 출력의 크기는 $\pm 10V$ 범위이며 표시창에 표시하기 위해 신호의 크기를 조정하고 안정화하는 역할을 하도록 설계하였다.

자화 주파수는 최초 100 - 120 Hz 로서 1차 분주회로에서 점퍼를 이용하여 1/2, 1/4, 1/8 의 주파수를 얻을 수 있으며 2차 분주에서는 1/4로 분주하여 최종적으로 30, 15, 7.5, 3.75 Hz 의 4가지 주파수를 얻을 수 있다. 또 이 주파수를 유량계의 직경 또는 다

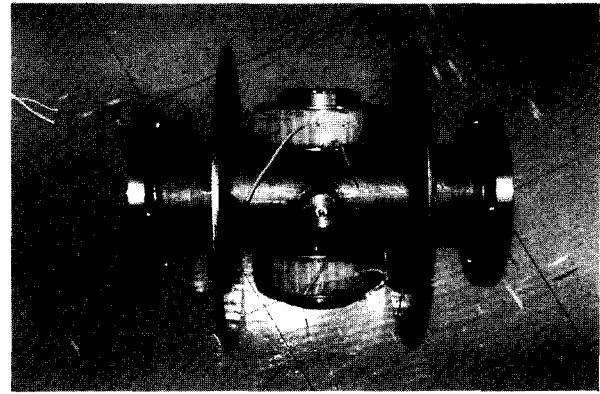


Fig. 4 The measuring tube of developed electromagnetic flowmeter

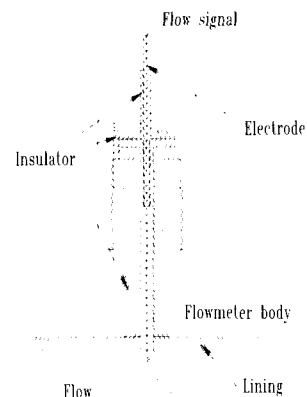


Fig. 5 The design of electrode

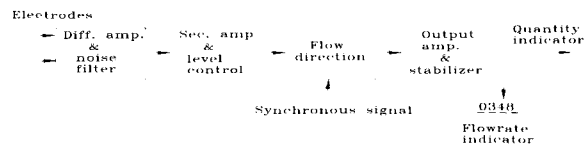


Fig. 6 The block diagram of main signal processing circuit

른 조건에 따라 점퍼를 이용하여 선택할 수 있으며 출력 주파수는 역위상으로 25%의 duty를 가진 펄스 형태로 출력된다.

한편 코일의 구동은 전력의 소모가 많으므로 전류를 증폭하여 사용한다. 전류의 증폭을 위한 pre-driver는 op-amplifier가 2단으로 설치되었고 초단증폭, feedback 및 정규환회로에 의한 schmidt 회로가 구성되어 있다. 코일 구동에 공급되는 출력 전류는 120-600 mA 범위에서 조절하여 공급되도록 설계하였다.

그리고 출력회로에서는 주 신호처리부에서 전압으로 환산된 유량신호를 펄스 형태와 4-20 mA의 출력을 위해 신호를 처리하는 회로이다. 전압 신호를 V-F 변환기를 이용하여 디지털 신호로 변환하게 된다. 이때 카운터 IC의 분주를 이용하여 다양한 범위의 분주율을 적용할 수 있다. 즉 유량의 흐름에 비례하는 펄스 신호

가 유량계를 통과한 물의 부피와 1 : 1 대응이 되도록 물리적인 의미를 가지게 정할 수 있다. 출력 신호를 아날로그 신호의 출력은 물리적인 의미를 가진 펄스신호를 V-I 변환기를 통하여 4-20 mA의 신호가 출력 된다.

4. 특성 실험

전자기유량계의 특성실험은 유동율에 비례하는 신호의 출력여부와 노이즈의 영향 요소를 실험하였다. 실험은 Fig. 7와 같은 장치를 사용하였으며 작동은 펌프에 의해 유체가 시험관로로 유동하면 기준유량계를 통과하고 시제품 유량계를 통과하게 된다. 2개의 유량계 사이에 누설이 없으므로 연속 법칙에 의해 동일한 측정값을 가리키게 된다.

기준유량계로 사용된 전자기유량계는 A사의 제품으로 구경이 50 mm(DN 50)으로서 측정불확도 $\pm 0.5\%$ 이내 이었다. 실험 방법은 설치된 펌프의 용량이 최대가 되는 유동율 $67.3\text{ m}^3/\text{h}$ 부터 $2.84\text{ m}^3/\text{h}$ 까지 약 $5\text{ m}^3/\text{h}$ 간격으로 유동율을 변화시키면서 개발된 전자기유량계의 출력신호를 비교하였다. 신호 변화 과정의 이득을 조정하여 유동율 단위의 20%가 출력 신호의 전압이 되도록 조정하였다. 실험은 유동율을 최대유동율에서 최소유동율 까지 실험하고 다시 유동율을 증가시키는 방법으로 3회 실험하여 유동율에 따른 신호의 비례 여부를 실험하였다.

또 신호처리회로의 각 부분에서 외부의 요소가 유량신호에 미치는 영향을 실험하였다. 즉 전자기유량계의 측정관에서 유량신호는 매우 미약하여 외부의 기계적인 진동이나 전기적인 영향에 매우 민감하였다. 이러한 결과를 정량적으로 표현할 수는 없지만 펌프의 진동에 의한 요소와 자기장의 변화에 따른 신호의 불안정성이 있음을 알았다. 즉 시제품 전자기유량계는 측정관과 신호처리회로는 편의상 별도로 제작하여 선으로 연결된 상태이므로 외부의 영향을 많이 받았다. 특히 측정관에서 코일과 신호 검출선이 강철관으로 격리되어야 안정된 신호를 얻을 수 있었다.

Fig. 8은 개발된 전자기유량계 특성실험의 결과를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 유동율에 따라 전자기유량계는 안정적으로 선형적인 출력을 보이고 있음을 알 수 있다. 즉 유동율 범위 $3\text{ m}^3/\text{h}$ 에서 $70\text{ m}^3/\text{h}$ 까지 측정범위 20 : 1 이상에서 안정된 선형성을 보이고 있다. 특성 실험에서는 신호 검출선과 자화를 위한 선이 비교적 길게 설치되어 있어 노이즈의 가능성이 높았고 또 실험을 위해 코일과 전극 부분을 밀봉하지 못한 상태에서 실험하여 안정성이 떨어지는 상태이었으나 선형성은 만족할 만한 결과를 얻었다고 할 수 있다.

개발된 시제품은 상품화 연구과정에서 보다 안정된 신호선의 처리와 환경에서는 보다 양호한 선형성과 불확도 $\pm 1\%$ 이내의 전자기유량계를 제작할 수 있을 것이다.

4. 결론

전자기유량계를 개발하기 위해 측정관과 신호처리회로를 설계 제작하였다. 측정관은 자기장을 발생하는 코일과 유량신호를 취출하는 전극으로 구성되어 있다. 신호처리회로는 코일을 구동하는 회로와 측정된 신호 신호를 유량단위로 환산하는 주 신호처리회로, 출력회로와 전원 및 클럭 발생부로 구성되어 있다.

연구의 결과로 측정관의 재질에 따른 신호특성과 설계기술, 파이프 직경에 따른 코일의 설계기술, 전극의 절연과 누설방지를 위한 설계 기술과 수신호 처리회로, 코일 구동회로 및 잡음제거를

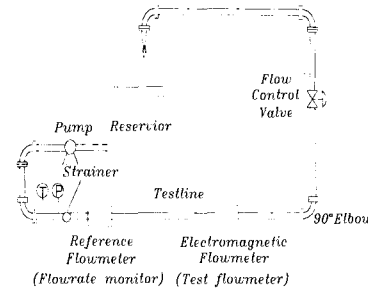


Fig. 7 The flowmeter calibrator

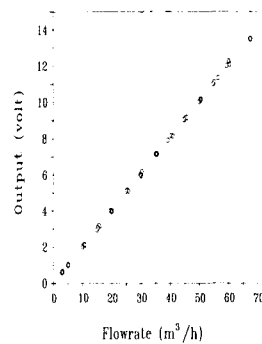


Fig. 8 The test results of developed flowmeter

위한 설계 및 배선에 관한 기술을 확보할 수 있었다. 또 전자기유량계는 외부의 노이즈에 취약하고 이를 극복하기 위한 과정도 설계 기술과 같이 중요하며 정량적으로 표현할 수 없는 know-how를 습득하였다.

그리고 기존의 유량계와 비교 실험한 결과 선형성이 우수하였으며 상품화 연구에서 불확도 $\pm 1\%$ 이내의 경쟁력있는 상품을 설계 제작할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Shercliff J.A., 1954, "Relation Between the Velocity Profile and the Sensitivity of Electromagnetic Flowmeters" J. Appl. Phys. Vol. 25, pp. 817-818.
- [2] Bevir M.K., 1970, "The Theory of Induced Voltage Electromagnetic Flowmeters" J. Fluid Mech. Vol. 43, pp. 577-590.
- [3] Engl W.L., 1970, "Der Induktive Durchflussmesser mit Inhomogenem Magnetfeld", Arch. für Electrotechn.. Vol. 5, No. 6, pp. 126-134.
- [4] JIS B 7554, 1993, "Electromagnetic Flowmeters (in Japanese)".
- [5] 임기원, 2002, "곡관의 하류에 설치된 전자기유량계의 신호특성에 관한 실험적 연구(난류)", Submitted for publication of J. of KSME(B)
- [6] 백종승 등저, 2002, "2001년 산학연 공동기술개발 전국컨소시엄사업최종보고서", KRISS/IR--2002-049