

전자펌프 시스템에서 전자유량계 특성 해석

윤태규, 전문호,곽희성, 김창업
호서대학교 전기공학과

Analysis of Electromagnetic Flowmeter Characteristics in Electromagnetic Pump System

Tae-Kyu Yoon, Mun-Ho Jeon, Hee-Sung Kwak, Chang-Eob Kim
Department of Electrical Engineering, Hoseo University

Abstract - 전자유량계는 전자유도법칙을 발견한 패러데이의 원리를 이용한 것이다. 도체가 자장 내에서 운동할 때 그 도체 내 자장 및 운동방향에 서로 직각으로 기전력이 발생하며, 그 크기는 자속밀도와 유속에 비례한다. 본 논문에서는 전자유량계의 측정원리를 이용하여 용융금속 이송용 전자펌프 시스템에서 전자유량계의 유량신호를 해석하였다. 또한 유량신호의 크기가 유동과 자속밀도의 크기에 따라 어떻게 영향을 받는지 유동해석을 이용하여 분석하였다.

1. 서 론

전자유량계는 Michael Faraday의 전자기유도현상 원리를 이용한 것으로, 전도성 유체의 유속과 인가된 자기장에 수직방향으로 생성되는 유기기전력으로부터 유체의 유량을 측정하는 계측기이다. 전자유량계는 기존의 기계식 유량계와 달리 측정관 내에 가동부가 없어 보수가 필요 없을 뿐만 아니라 차압식과 같이 유체의 흐름을 방해하는 부분도 없어 정밀도 및 효율이 높다. 또한 전기적 신호에 의해 유량을 측정하므로 응답성이 매우 빠르다. 유량계와 멀리 떨어진 곳에서도 그 전기적 신호를 확인할 수 있으며, 유독성 유체나 방사능 유체, 액체금속 등의 유량측정에 이용될 수 있다[1-2].

전자유량계의 장점으로는 전도성 유체의 경우 유체의 온도, 압력, 밀도, 점도, 전기 전도율 등에 관련 없이 유량을 측정할 수 있고, 유량측정 정확도가 매우 높다. 전자유량계의 출력신호는 유량에 비례하고 유량측정 범위가 광범위하다. 전도성 유체인 경우 불순물이 포함된 유체의 유량측정이 가능하고, 가동부가 없어 신뢰성이 높으며, 부식성 유체의 유량측정도 가능하다. 단점으로는 유속에 비례하는 전압을 발생시키기 때문에 관내에 만수가 되어야 하고, 전극이 이물질에 의하여 접촉되게 되면, 측정오차가 발생하거나 측정 자체가 불가능하게 되는 경우도 있다. 기체, 기름 등의 전기전도성이 낮은 유체의 유량측정은 불가능하고 가격이 고가라는 단점이 있다[3].

본 논문에서는 전자펌프 시스템에서의 전자유량계 특성을 해석하였다. 관내에 유체가 만수가 되어 흐른다고 가정하여 유속 및 자속과 전자유량계의 특성을 해석하였다. 그림 1은 전자펌프의 개략도를 나타낸 것이다. 그림 1에서 보는바와 같이 금속을 용융시켜 전자펌프의 힘으로 용융금속을 이송시키게 되며, 이 힘에 의해 도전율을 가진 용융금속은 유속이 발생하게 된다.

전자유량계는 두 개의 영구자석을 관 양쪽에 배치하여 관경에 따라 자장이 형성되게 하였다. 이때 자장이 형성된 배관을 전도성 용융금속이 통과하면, 전극을 통하여 전압이 유도된다. 이 전압은 유체의 평균 유량 속도에 직접적으로 비례하며, 2개의 전극을 통하여 측정한다.

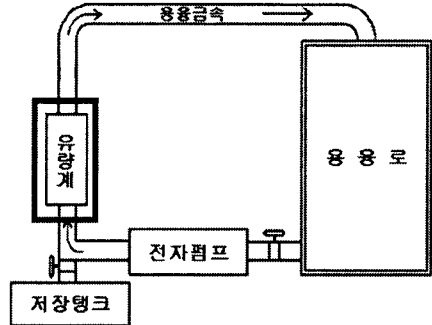
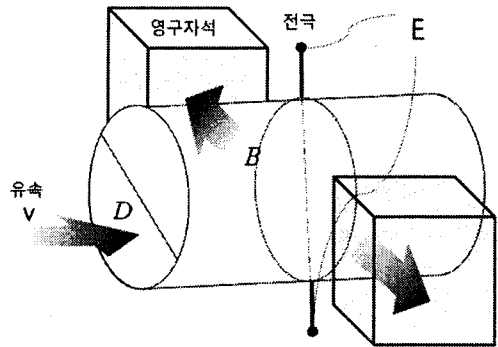


그림 1. 전자펌프 시스템 개략도

2. 전자유량계의 특성 해석

2.1 전자유량계 측정원리

그림 2는 전자유량계 측정원리를 나타낸다. 전도성 유체의 유속과 가해진 자기장에 수직인 방향으로 전극에 유기기전력이 발생한다. 따라서 자속과 전극에 유기되는 전압을 알면 관내의 유속을 알 수 있다.



- B: 자속밀도
- D: 유동관 직경
- v: 유체의 평균유속
- E: 전극에 유기되는 전압

그림 2. 전자유량계 측정원리

전자유량계에서 유량신호를 측정하기 위해 유동관 내부의 유체는 만수가 되어야 한다. 만수가 되지 않으면, 전극이 단락되어 신호를 정확히 측정하지 못한다.

전자유량계는 유동관, 신호기전력을 얻는 전극 및 자

속을 발생하는 영구자석으로 구성된다. 본 논문에서 사용된 유동관은 내경 19.7[mm], 외경 21.3[mm], 길이 200[mm]이며, SUS304로 제작하였다. 유동관은 자기장이 제거되었을 때 잔류자기가 없어야 한다. 즉 전자유량계의 유량신호는 자기장의 세기에 비례하기 때문에 유동관에 잔류자기가 남아있으면 유량신호가 시간이 지남에 따라 변한다. 이러한 문제를 줄이기 위해 비자성 물질인 SUS304를 유동관 재질로 선택하였다.

전극 재료는 유체와 직접 접촉되어 유체의 마모, 부식에 충분히 견딜수 있는 것이어야 한다. 또한 전극은 액체 누설을 막아주는 중요한 역할을 한다. 극히 작은 부식에 의해서도 액체가 누설되어 전극의 절연이 불량하게 되어 이로 인한 문제 발생 가능성이 있기 때문에 전극 재질의 선정은 신중함을 기하여야 한다. 본 시스템에서는 전극의 재질로 STS316L을 사용하였다. 또한 용융금속이 만수가 아닐 경우에 생길 수 있는 전극과 유체사이의 비접촉을 방지하기 위해 유동관 내부에 전극을 3[mm] 삽입되도록 하였다. 영구자석은 온도에 대한 안정성이 뛰어난 알리코를 사용하였다. 그림 3은 전자유량계의 실제 제작된 사진이다.

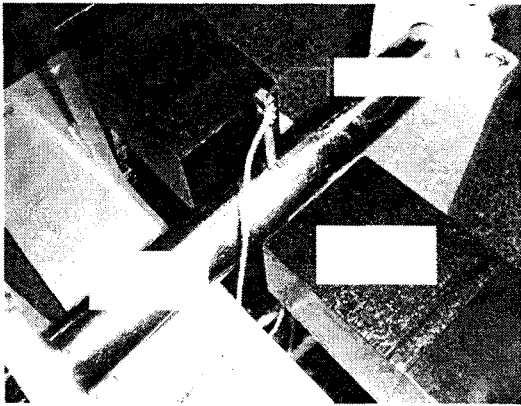


그림 3. 전자유량계

전극에 유도되는 전압은 자속밀도, 유동관 직경 및 유체의 평균속도에 비례하는 신호가 유기되며 식(1)과 같이 나타난다[4-5].

$$E = B \cdot D \cdot v \quad (1)$$

유기전력은 유동해석으로 구한 유체의 평균유속과 유한요소로 해석한 자속밀도, 유동관의 직경으로 구할 수 있다.

2.2 유동 해석에 의한 유속 계산

그림 1에서 유동은 전자펌프의 전자력에 의하여 용융금속이 축 방향으로 흐르도록 구성하였다. 액체금속의 유동해석을 위해 유동관 내부 유체유동방정식에 전자력을 고려한 유체방정식과 유동의 연속성을 나타내는 연속방정식을 사용하였다[6].

$$\vec{F}_L = \vec{J} \times \vec{B} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{F}_L \quad (4)$$

여기서 \vec{F}_L Lorentz force [N/m³], \vec{J} 전류밀도[A/m²], \vec{B} 자속밀도[T], P 압력[Pa], \vec{v} 속도[m/s]이다.

운동량방정식으로부터 속도를 구할 수 있고, 연속방정식에서는 압력을 구할 수 있다. 그러나 연속방정식에는 압력이 포함되어 있지 않으므로 운동량방정식과 결합하여 해석하여야 한다. 이 결합 방법에는 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)을 사용하였다[7]. 유동의 경계조건으로는 벽면에서의 no-slip, no-penetration 조건과 출구에 Neumann 조건을 사용하였다. 유동해석에 사용된 용융 우드메탈의 물성값을 표 1에 표시하였다. 그림 4는 본 시스템을 대상으로 유동 해석을 통해 구한 유동관 내부의 유속을 나타낸다. 벽면에서의 유속은 no-slip 조건에 의해 0이고, 중앙으로 갈수록 마찰이 작아지기 때문에 유속이 커진다. 유동관 내의 유속을 평균하며 약 0.29[m/s]이다.

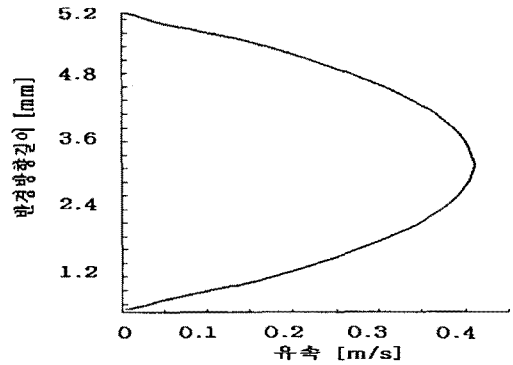


그림 4. 전자펌프 시스템에서의 유속

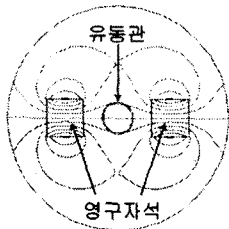
표 1 우드메탈의 물성 값

특성	단위	wood metal
구성(중량비)	[%]	Bi 50 Pb 25 Sn 15 Cd 10
밀도 ρ	[kg/m ³]	9700 at 500K
동적점성도 ν	[m ² /s]	0.13
녹는점 T_m	[°C]	70
열전도율 k_s	[W/m°C]	15
비열 C_p	[J/(kg)(°C)]	0.18
전기전도율	[S/m]	1×10^6

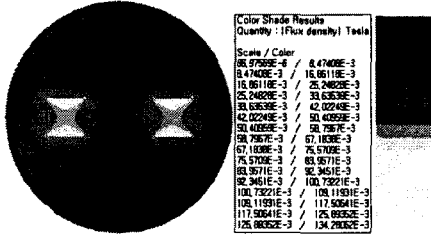
2.3 유한요소 해석에 의한 자속밀도 계산

본 논문에서는 Flux-2d를 사용하여 유체내의 자속밀도를 해석 하였다. 영구자석의 잔류자속밀도는 0.14[T]이다. 그림 5는 유한요소로 해석한 결과로 (a)는 자속분포, (b)는 자속밀도 분포이다.

그림 6은 유한요소 해석 결과로 유동관내 자속밀도가 0.02-0.027[T]로 분포되어 있으며 이를 평균한 자속밀도는 0.23[T]이다.



(a) 자속 분포



(b) 자속밀도 분포도

그림 5. 유한요소 해석 결과

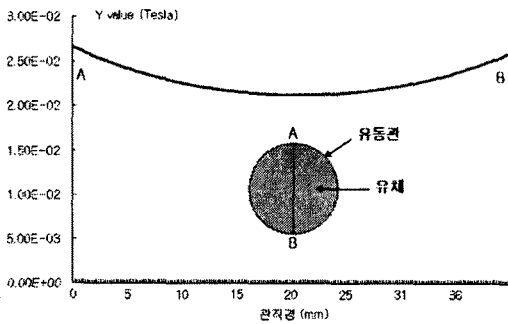


그림 6. 유동관내 자속밀도 분포

2.4 전자유량계 특성해석

전자유량계 신호해석을 위해 유동 및 자속밀도를 해석하였다. 유동해석한 유체의 평균유속은 0.29 [m/s], 유한요소로 해석한 자속밀도 0.023[T], 전극간격 19.7[mm]로부터 유기전압은 0.13[mV]이다. 그림 7은 평균유속이 0에서부터 0.29[m/s]까지 변화할 때 유기되는 전압을 해석한 결과이다. 그림 7에서 보는바와 같이 유속에 대한 유기기전력은 직접적으로 비례함을 알 수 있다. 전자유량계 신호로부터 유량율은 식 (7)로부터 구할 수 있다 [8].

$$Q = v \times A \quad (7)$$

여기서 v 는 유체평균속도이고, A 는 유동관의 단면적으로 $\frac{\pi D^2}{4}$ 이다. 식(7)을 정리하면 식(8)과 같이 쓸 수 있다.

$$Q = \frac{E \cdot \pi D}{4B} \quad (8)$$

평균자속밀도 0.023[T], 전극간격 19.7 [mm], 유도전압 0.13[mV]로부터 유량율을 구하면 약 0.85 [kg/s]이다.

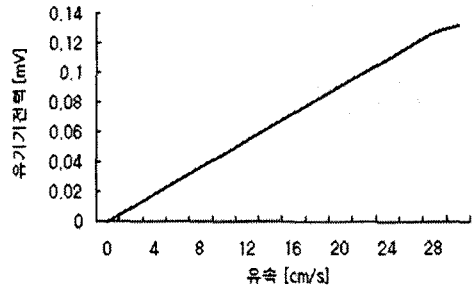


그림 7. 유속에 따른 전자유량계 신호 특성

3. 결 론

본 논문에서는 전자펌프 시스템에서의 전자유량계 신호 특성을 해석 하였다. 전자유량계 신호 특성 해석을 위해 전자펌프 시스템 유동관내에 흐르는 유체의 유속을 해석 하였고, 유한요소 해석을 통하여 자속밀도 값을 계산하였다. 해석에 사용한 유체는 용융우드메탈이며, 해석 결과 평균 유속 0.29[m/s], 자속밀도 0.023[T]로 부터 약 0.13[mV]의 유도전압을 얻었다. 이때의 유량은 약 0.85[kg/s]이다. 향후 본 논문에서 특성 해석한 결과와 실제 실험을 통한 결과를 비교 분석할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원의 지원에 의하여 기초전력 연구원(R-2005-7-088) 주관으로 수행된 과제임

[참 고 문 헌]

- [1] 차재은, 안예찬, 김무환, "전자유량계를 이용한 기포 및 슬러지 유동 측정방법 연구," 대한설비공학회 동계학술 발표회 논문집, pp. 363-368, 2001.
- [2] 황종선, 남호운, 이용범, 김용균, 김동화, "와전류식 전자유량계 설계제작에 대한 실험적 특성연구," 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집, pp.281-284, 1997.
- [3] 김용기, 이태원, "전자유량계의 설계변수가 유량측정 성능에 미치는 영향," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.3032-3037, 2005.
- [4] 임기원, "전자유량계의 설계 및 제작," 대한기계학회 논문집 B권, 제27권 제10호, pp. 1385-1392, 2003.
- [5] Vincent Cushing, "Electromagnetic Flowmeter," The Review of Scientific Instruments, vol.36, no.8, pp. 1142-1148, 1965.
- [6] 김민석, 김경현, 전문호, 김창업, 김서현, 권정태, "전자기력에 의한 덕트 내부의 유동특성," 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 114-143, 2007.
- [7] Suhas V. Patankar, Numerical Heat Transfer And Fluid Flow, pp.126-133, 1980.
- [8] Aline I. Maalouf, "The Derivation and Validation of the Practical Operating Equation For Electromagnetic Flowmeters: Case of Having an Electrolytic Conductor Flowing Through," IEEE Sensors Journal, vol.6, no.1, pp.89-96, 2006.