

## 와전류식 전자 유량계의 출력특성 연구

0

황 종 선, 남 효 윤, 이 용 범(한국원자력연구소), 김 종 화(대전산업대)

### A study on a Characteristics of Eddy current Flow meter

J.S.HWANG, H.Y.NAM, Y.B.LEE (KAERI) D.H.KIM (Thejon National Univ. of Tech)

**Abstract**

In this paper, the eddy current flowmeter with 4-coil group is designed and made on the basis of theory, and its characteristics is considered through dry test and flow experiments. The biggest output signal varied with wave form and frequency, and 900kHz in rectangular wave, 27.12kHz in sine wave.

The conductivity is bigger, the output signal is bigger and has a linearity between both relation, and also The Magnetic Reynolds Number and output characteristics. The flow faster and the output signal is bigger.

**1. 서론**

전자식 유량계는 1950년대 J. S. Arnold, L. D. Landau[1] 등이 플레밍의 오픈손 법칙을 이용해 그 기본 원리를 제시한 것으로 일반 프로세서에 폭 넓게 이용 될 수 있다는 것이 입증됨에 따라 많은 연구자[1-2]들에 의해 본격적으로 연구가 수행되게 되었다.

전자식 유량계는 종래의 기계식 유량계에 비해 구동부가 없어 보수가 필요 없을 뿐만 아니라 차압식과 같이 유체의 흐름을 방해하는 부분도 없어 정밀도 및 효율이 대단히 높다. 따라서 공정 제어 및 유량측정에 필수적인 센서로 취급되어 선진 각국에서는 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

전자식 유량계의 이론 및 설계기법을 처음으로 완벽하게 제시한 것은 1962년 영국의 Schercliff[3]로 그는 The theory of electromagnetic flow measurement[3]라는 저서를 통해 전자식 유량계에 대한 자장 이론, 설계기법 등을 종합적으로 기술하였다.

이와 같은 전자식 유량계는 구성방법에 따라 전극식과 와전류식으로 나누어지고 와전류식에서도 여자전류 파형에 따라 구형파식, 상용 주파수식, 펄스식 등으로 구분되는데 각각의 여자 방법에 따라 효율 및 특성이 다르다.[9-10]

전극식의 경우는 Schercliff의 이론을 바탕으로 1970년대에 영국의 M.K.Bevir의 가중합수를 이용한 자장의 해석기법[4], 감도에 대한 특성연구[5], J. Hemp의 점전극 전자유량계에 대한 가중합수 w를 이용한 해석기법등 많은 연구가 이루어져 왔다.

이와 1980년대에는 M.Tarabed와 R. C. Baker의 자기 레이놀즈수(Magnetic Reynolds Numbers)와 신호 전압과의 관계를 제시하여 유체의 도전성과 전자 유량계의 출력관계를 정립하여 설계기법에 큰 전환기를 갖게 되었다.[7]

또 T. J. Cox[8]은 기존의 점전극 설계이론에서 탈피하여 판형전극(Large Surface electrode) 전자 유량계에 가중합수를 이용한 해석기법을 제시하여 전극식 전자 유량계의 설계기법을 다양화 시켰다.

한편 와전류 유량계는 Schercliff 설계이론을 이용해 미국의 D.E.Wiegand 및 Michels[11]가 제시한 설계 실험 데이터, Popper, Wiegand, Glass[9]의 유체온도변화에 따른 특성 실험, Mahmound[13]의 유체의 레이놀즈 수와 유량특성등 많은 연구를 거쳐 시험용 액체유속도에서 다각적으로 실증 연구가 이루어져 왔으나 1979년도 원전 사고 이후 원자력에 대한 연구가 중단됨에 따라 현재는 연구진전이 없는 상태이다.

그러나 일본과 프랑스는 주로 액체금속류의 용도로 고온용 전자 유량계를 설계, 제작하여 Monju 및 Super Phenix 등에 이용하며, 최근에는 대형 유량계의 성능개선 연구에 박차를 가하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 여자코일을 6개군으로 한 새로운 형태의 와전류식 전자 유량계를 설계, 제작하고 이의 여자 및 유량특성 등을 실험을 통해 출력특성을 고찰하고자 한다.

**2. 와전류식 전자 유량계 설계이론**

**2.1. 동작원리**

본 연구에서 설계한 와전류 유량계의 구조는 그림 1과 같이 1차 코일 그룹수가 2개 2차 코일 그룹수가 4개, 총 6개로 구성되어 있다.

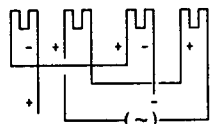
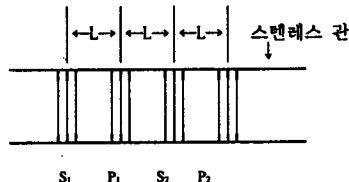


그림 1. 와전류 유량계의 구조

1차 코일의 여자전류에 의해 액체 금속 내에서 와류가 발생하고 이 와류와 유속 방향에 대해 직각으로 설치한 환상형의 2차 코일과의 쇠교에 의해 전압이 유기 되는데 이 유기전압은 유속에 비례하므로 전압을 검출하면 유량 측정이 가능하다.

신호 전압의 크기는 유체의 도전성, 라인홀츠 수 및 자기 레이놀즈 수, 기타 여자 회로의 구조등으로 각종 파라미터와 매우 밀접한 관계가 있고 그 방향은 상류 측에서는 (+)신호, 반대 방향에서는 (-)의 신호를 갖는다.

본 연구에서 제작한 와전류 유량계의 전류분포는 벡터포텐셜을 이용해 유속에 대해 원주 방향에서의 한 방향만 고려하면  $A_r=A_\theta=0$ ,  $A_z=A_z(r)$ 이므로 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial r} - \frac{A_z}{r^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} = -\mu_0 j(r) + \mu_0 \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \mu_0 \sigma V(r) \frac{\partial A}{\partial z} \quad (2.1)$$

여기서  $e$ 는 단위벡터,  $A$ 는 자기벡터 포텐셜이다.

**2.2. 유체편벽의 경계조건**

유체관 벽  $w$ 의 두께가 관 반경보다 훨씬 적으면( $w/a \ll 1$ ) 관벽은 전류가 흐르는 얇은 판으로 생각 할 수 있으므로 유체관에 대한 벡터 포텐셜은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\left( \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) - \left( \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) = \sigma w \mu_0 \left( \frac{\partial A}{\partial t} \right) \quad (2.2)$$

**2.3. 신호전압**

1차 코일 전류에 의해 자속 분포가 형성되고 이에 의해 유체 내에 환상전류가 발생하여 신호전압이 유기 되는데 이때 유도전압  $v$ 는 여자코일의 위치에 따라 식 (2.11)로 주어지는 벡터 포텐셜의 결과에 의해 매우 다르게 복잡한 양상을 갖는다. 본 논문에서는 이에 대한 상세한 해석은 생략하고 식(2.2)으로 주어지는 다음 식을 이용한다.

$$v = f A d s = 2 \pi r \frac{\partial A_s}{\partial t} \quad (2.3)$$

일반적으로 유량계의 여자전류 및 출력전압과 유속과의 관계는 유속이 1[m/s]일 때 1[mV]가 되도록 여자전류를 결정하는 것이 가장 효과적이고 이 경우 여자전류, 여자코일 굵기, 권수, 유체관의 직경 등과 밀접한 관계가 있다. D.E.Wiegand는 이들을 고려해 다음과 같은 실험식을 제시하였다.

$$v_s = k_s \Sigma \frac{u \, dA}{A=0 \quad u_s A_s} \quad (2.4)$$

$$k_s = \frac{\pi}{4} \mu k_a k_b N_1 N_2 N_3 N_4 I_0$$

여기서  $v_s$  = 신호전압,  $k_s$  = 설계상수,  $\mu$  = 유체의 투자율( $4\pi \times 10^{-7}$ ),  $k_a = 1$ 차코일의 구조에 의해 결정되는 상수로 0.646,  $k_b = 2$ 차코일의 구조에 의해 결정되는 상수(1.06),  $r$  = 여자 주파수,  $N_1$  = 1차 코일권수,  $N_2$  = 2차 코일권수,  $N_3$  = 1차 2차 권수의 그룹수로 본 연구에서는 6에 해당된다. 또  $I_0$  = 1차 여자전류,  $A_s$  = 유체관의 단면적,  $u$  = 유체의 평균유속,  $\rho_l$  = 유체의 고유저항이다.

**2.4. 레이놀즈수와 신호전압**  
유체의 유속특성에 따라 레이놀즈 수(Reynolds Number)가 다르므로 신호전압도 다르게 된다.

여기서  $u$ ,  $u_m$ 를 각각 평균유속 및 최대유속이라 할 때 Knudsen과 Katz[14]은 다음과 같이 정의하였다.

$$\frac{u_m}{u} = 0.655 + 0.036 \log Re \quad (2.5)$$

**2.5 자기 레이놀즈(Magnetic Reynolds) 수와 신호전압**  
전자 유량계는 주로 나트륨과 같은 도전성 유체에 이용되므로 자기 레이놀즈 수에 따라 신호전압, 설계인자가 달라 이에 대한 검토가 필요하다. 관 재료 및 유체의 투자율을  $\mu_m$ , 유체의 도전율을  $\sigma$ , 관 직경을  $a$ , 유체의 평균유속을  $v$ 라 하면 자기 레이놀즈 수(Magnetic Reynolds Number) $R_m$ 은

$$R_m = \sigma \mu_m a v = 4 \pi \times 10^7 \sigma a L \quad (2.6)$$

로 주어진다. 여기서  $L$  =  $L/a$ ,  $i$  =  $\sqrt{\sigma \mu_m a^2}$ 이고  $a$ =유체관 반경,  $L=1$ 차 및 2차 코일의 간격,  $t$ =시간이다. 즉, 정확한 측정을 위해서는 측정 유체에 대해 도전성이 주어져야 한다.

본 연구에서는 유체관에 1인치 스테인레스 관(내경=27.2mm, 외경=42mm, 두께=4.3mm)을 사용하고 유체가 400℃ 나트륨인 경우 400℃에서 나트륨의 도전율은  $\sigma = 4.56 \times 10^6$ 이므로  $i = 0.64$ 이고  $R_m = 5.7 \times 10^7$ 이 된다.

### 2.6 여자전류의 결정

여자전류는 전자 유량계의 감도에 영향을 미치는 자속밀도와 밀접한 관계가 있어 설계에 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 전류의 크기는 코일의 권수와 코일의 굵기, 유체관의 크기 등과 함께 결정한다.

### 2.7 여자전류 파형과 신호전압

와전류 전자 유량계는 여자전류의 형태에 따라 출력 신호의 파형 및 효율이 크게 변하므로 어떠한 형태의 여자 전류를 이용 할 것인가를 결정하여야 한다.

본 연구에서는 낮은 주파수의 구형파를 이용하는 것이 효율 및 잡음계측 측면에서 유리한 것으로 판단되어 있어 이를 이용하였다.

특히 본 연구에서는 가변 주파수 및 파형 여자장치를 이용해 실험적으로 이를 검토한다.

## 3. 외전류식 전자 유량계 설계, 제작

### 3.1. 검출부 재료

검출부의 구성 요소로는 유체관, 여자 및 검출코일, 절연재료인데 본 연구에서는 유체관 재료로는 비자성 고저항인 스테인레스(SUS 304)관, 검출코일의 재료는 일반용의 예나멜 동선을 이용하였다. 그림 2는 설계한 보빈의 형상을 나타낸 것이다.

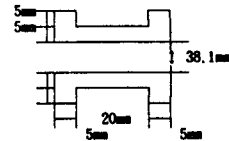


그림 2 보빈의 설계도

## 3.2 관 직경과 자속밀도

전자 유량계는 관 직경에 따라 내부의 자속분포가 매우 다르므로 관 직경 변화에 대해 여자 전류 및 파형의 형태도 다르게 하여야 한다.

일반적으로 유기기전력과 관 직경과의 관계는 자속밀도를  $B$ [wb/m<sup>2</sup>], 유속을  $v$ [m/sec], 관 직경을  $D$ [m]라 하면

$$E = BDV \quad (4.1)$$

로 주어지고 관 직경이 커지면 동일 기전력 발생을 위해서 자속밀도  $B$ 는 작아지므로 계산회로의 코일부 체적이 커지고 소 구경 관에서는 작아진다.

본상 액체 유속에서의 경제 유속은 3 m/s 전후이고 발생 기전력은 1m/s 유속에 대해 1 m/s 정도 발생하도록 자속밀도  $B$ 를 결정하면 효과적이므로 [9] 관경 1인치의 스테인레스 관을 이용하여 1 m/s 유속에서 1 mV 가 되도록 하면 자속밀도  $B$ 는

$$B = E/DV = 1 \times 10^{-3} / 2.54 \times 10^{-2} \times 1 = 0.039 \text{ wb/m}^2 = 390 \text{ Gauss}$$

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 Dry Test

1) 여자 주파수와 출력 전압과의 관계  
설계, 제작한 유량계에 대해 최적의 출력특성을 얻기 위해서 여자 주파수를 가변 시켜가면서 출력 특성을 검토하였다.

Dry Test의 경우는 구형파 900Hz에서 최대 출력값 2.085[V]를 갖고 공심의 경우는 9500Hz일 때 2.252[V]가 최대의 값이 되고 900Hz 및 9500Hz를 중심으로 주파수가 증가하거나 감소함에 따라 출력전압은 감소한다.

그림 3은 여자전류 주파수가 구형파 60Hz일 때 출력특성을 오실로스코프로 관찰한 것으로 최대 출력전압은 Dry Test가 3.011[V], 공심이 2.93[V]로 Dry Test의 경우가 높음을 알 수 있다.

한편 그림 4는 같은 조건에서 주파수만 300Hz로 가변시킨 경우의 출력전압 파형인데 Dry Test시는 최대전압이 21.17[V]이고 공심인 경우는 20.71[V]로 그림 4에 비해 훨씬 크게 나타났다. 또 DC  $V_m$ 는 각각 3.409, 3.36으로 역시 Dry Test의 출력이 큼을 알 수 있다.

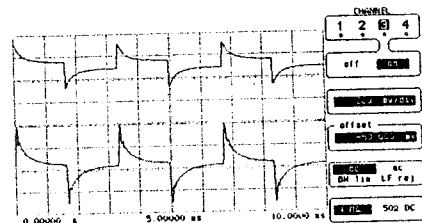


그림 3(a) 여자 주파수가 구형파 60Hz일 때의 파형특성

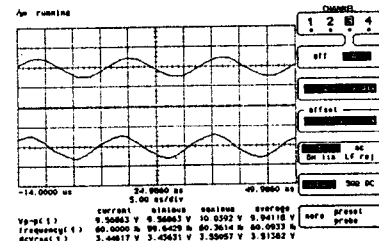


그림 3(b) 여자 주파수가 정현파 60Hz일 때의 파형특성

2) 여자전류 파형과 출력전압의 관계  
 여자전류의 파형에 따라 출력특성을 검토하기 위해 여자전류 파형을 구형파와 정현파로 구분하여 여자 시켰다.

그림 4는 이의 결과를 나타낸 것으로 정현파의 경우는 리액턴스 영향으로 지연특성이 조금 있을 뿐 정현파의 출력이 비교적 잘 출력되고 있으나 구형파의 경우는 변화부분에서 매우 큰 출력특성을 보이고 있다.  
 또 표 3은 정현파 여자전원에 대한 변화 값을 나타낸 것으로 구형파와는 다른 주파수에서 최대의 출력값을 나타낸다.

표 1. 구형파 여자전원에 대한 출력변화 값

여자주파수 [Hz]	여자출력전압 [mV]	공심출력전 [mV]
40	0.35	-
70	0.462	-
100	0.55	0.369
150	0.681	0.451
200	0.788	0.523
300	0.946	0.643
400	1.141	0.823
500	1.206	0.833
700	1.794	0.912
900	2.085	1.038
1000	1.926	1.112
1100	1.488	1.148
1200	1.052	1.178
1300	0.720	1.204
2000	-	1.322
5000	-	1.431
9500	-	2.252
10000	-	2.128
11000	-	1.546
15000	-	0.319
20000	-	0.091

표 2. 정현파 여자전원에 대한 출력변화 값

여자주파수 [Hz]	여자출력전압 [mV]	공심출력전압 [mV]
150	0.581	0.501
250	0.814	0.764
400	0.946	0.834
1000	0.985	0.934
1200	1.141	0.990
1500	1.145	1.032
2000	1.136	1.031
3000	1.107	1.038
5000	1.064	1.642
7000	0.342	1.842
8000	-	0.824
10000	-	0.424
15000	-	0.012

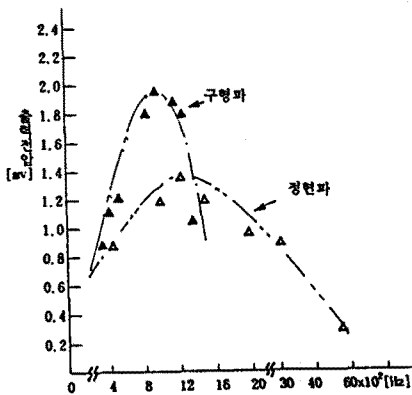


그림 4. Dry Test시의 여자 주파수와 최대출력과의 관계

표 3. 코일 그룹의 수와 출력값(구형파)

여자주파수 [Hz]	개시4출력전압 [mV]	2개시 출력전압 [mV]
150	0.581	0.401
250	0.814	0.624
400	0.946	0.734
1000	0.985	0.804
1200	1.141	0.890
1500	1.145	0.952
2000	1.136	0.931
3000	1.107	1.037
5000	1.064	1.031
7000	0.342	0.322

4.4 유압특성

1) 실험장치 구성

설계, 제작한 전자 유압계의 유속특성 실험을 위해 본 연구에서는 그림 5와 같은 실험장치를 구성하였다.

유압변화는 미리 계획된 프로그램에 의해 제어 가능한 PID제어기를 이용해 제어밸브를 동작시켜 유압제어를 하였다.

2) 실험방법

와전류 전자 유압계를 유압 실험장치에 연결하고 여자전류를 가변시켜 가면서 입력파형과 출력파형의 특성을 실험하고 또 수용액 종류에 따라라도 같은 반복 실험을 수행하였다. 이때 제어밸브의 제어범위를 0-100%가변 시켜 가면서 기준용 유압계의 지시치와 제작한 전자 유압계의 출력특성을 검토하였다.

3) 유체 특성검토

전자 유압계의 목적은 가능한 도전성 액체에 이용하기 위한 것으로 액체에 대한 도전성이 검토되어야 한다. 나트륨 또는 수은과 같은 액체를 이용 할 수도 있으나 실험의 용이성을 위해 염화나트륨 수용액을 여러 형태로 만들어 표 5와 같이 도전률과 수용액과의 관계를 미리 측정한 다음 제작한 유압계에 대해 출력신호 특성을 검토하였다.

표 4 도전률과 염화나트륨 수용액 종류

수용액 종류	도전률 [Ohm-meter]	비 고
1	$120 \times 10^{-9}$	수돗물 도전률
2	$120 \times 10^{-8}$	
3	$1 \times 10^{-8}$	
4	$2.19 \times 10^{-7}$	400'C 나트륨 도전률

4) 유속에 대한 출력신호

그림 5는 실험장특성실험에서 각각의 유속에 대한 출력신호 특성을 실험한 결과이다.

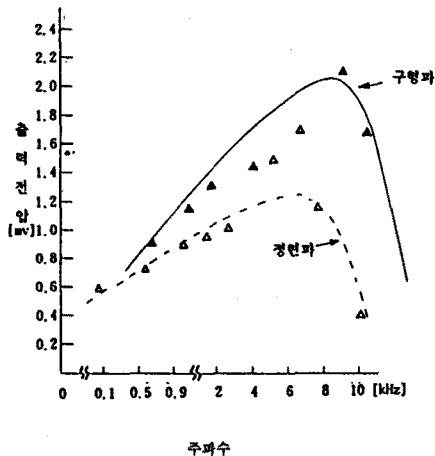


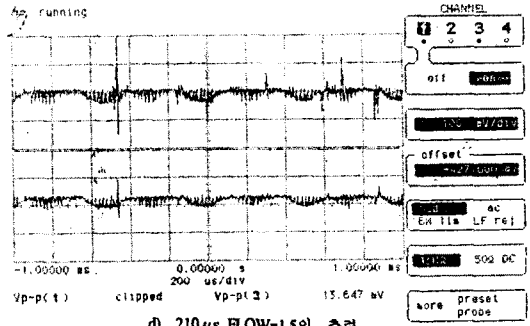
그림 5. 유압변화시 여자 주파수와 최대출력과의 관계

5) 도전률과 출력신호

표 5 및 그림 6은 각 도전률 수용액에 대해 같은 유속에서 측정한 결과로 도전율이 커짐에 따라 출력신호가 커지고 있음을 알 수 있다.

표 5 유속 출력신호 관계

도전률(Ohm-meter)	유속(m/s)	출력신호(mV)	R <sub>eq</sub>
0.1x10 <sup>7</sup>	1		1.256x10 <sup>-14</sup>
	2		2.512x10 <sup>-14</sup>
	3		3.768x10 <sup>-14</sup>
	4		5.024x10 <sup>-14</sup>
0.5x10 <sup>7</sup>	1		6.28x10 <sup>-14</sup>
	2		1.256x10 <sup>-13</sup>
	3		1.884x10 <sup>-13</sup>
	4		2.512x10 <sup>-13</sup>
1x10 <sup>7</sup>	1		1.256x10 <sup>-13</sup>
	2		2.512x10 <sup>-13</sup>
	3		3.768x10 <sup>-13</sup>
	4		5.024x10 <sup>-13</sup>
2.19x10 <sup>7</sup>	1		2.751x10 <sup>-13</sup>
	2		5.501x10 <sup>-13</sup>
	3		8.252x10 <sup>-13</sup>
	4		1.100x10 <sup>-12</sup>

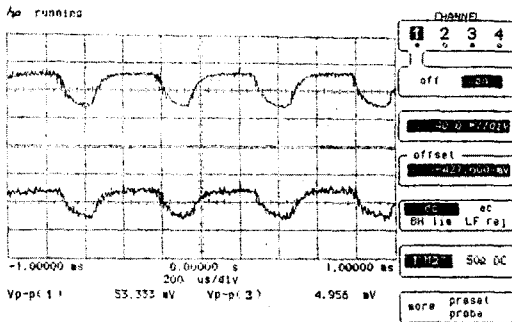


d) 210μs FLOW=1.5의 출력 주파수

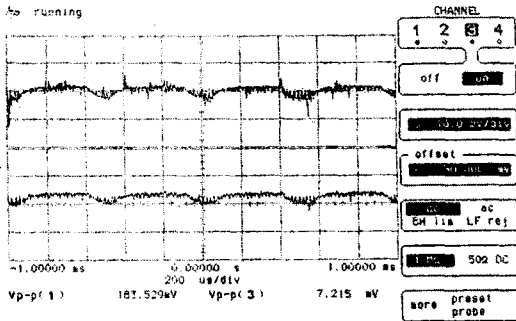
그림 5. 유량변화시 여자 주파수와 최대출력과의 관계

6) 유속 변화와 출력신호

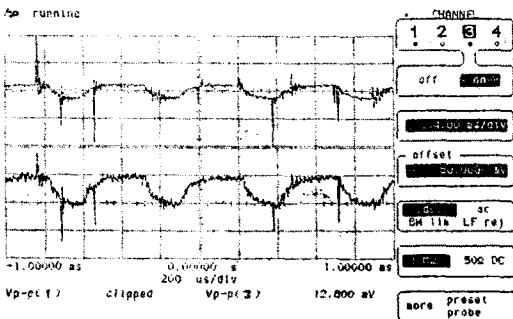
한편 각 도전률에 대해 유속과 출력신호의 관계를 나타낸 것이 표 6, 도전률 변화에 대해 유속이 커진다.



a) 170μs FLOW=0.5의 출력



b) 210μs FLOW=0.5의 출력



c) 170μs FLOW=1.5의 출력

5. 결 론

본 논문에서는 전자 유량계에 관련된 이론에 의해 입력 2개 출력 4개의 코일 그룹을 갖는 전자 유량계를 설계하고 이를 Dry Test 및 유량실험을 통해 특성을 검토하였다. Dry Test결과 최대의 출력을 내는 주파수는 파형 종류에 따라 다르고 구형파인 경우는 900Hz, 정현파인 경우는 27.12kHz로 나타났고 이때의 여자 주파수는 내부 철심의 삽입 정도에 따라 매우 다르다. 도전률을 다르게 하여 수용액을 만든 다음 유량을 가변 시켜 가면서 유속과 도전률과의 출력특성 실험을 수행한 결과 도전률이 클수록 출력전압은 크고 이들 관계는 직선특성을 갖는다. 또 도전률이 클수록 출력전압이 나타나는 주파수도 낮아지고 있다.

참고문헌

1. J. S. Arnold, "Electrodynamics of continuous media," Sci.Instrum, vol.22, pp.43-45, 1951.
2. Schercliff, "Fluid dynamics," I. Appl.Phys, vol.25, pp.817, 1954.
3. Schercliff, "The theory of electromagnetic flow measurement", Cambridge University Press, 1962.
4. M. K. Bevir, "The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters," J. Fluid Mech., vol.43, no.3, pp.577-590, 1971.
5. M. K. Bevir, "The predicted effects of red blood cells on electromagnetic flowmeter sensitivity," J.Phys.D:Appl.Phys, vol.4, pp.389-399, 1971.
6. J. Hemp, "Improved magnetic field for an electromagnetic flowmeter with point electrode," J. Phys.D:Appl.Phys, vol.8, pp.983-1003, 1975.
7. M. Tawabed and R. C. Baker, "Integrating electromagnetic flowmeter for high magnetic Reynolds numbers," J.Phys.D:Appl.Phys, vol.15, pp.739-745, 1982.
8. T. J. Cox, "An electromagnetic flowmeter with insulated electrodes of large surface area," J.Phys.E, vol.17, pp.488-503, 1984.
9. "전자유량계의 최근의 진보" 계측과 제어 vol.23, no.2, pp.20-27, 1989.
10. D. E. Wiegand, "Performance tests on an eddy current flowmeter," IEEE 15th Nuclear science symposium, 1968.
11. for cylindrical geometries", Brit.J.Appl.Phys, vol.1, pp.895-899, 1968.
12. M. K. Bevir, "Computation of electromagnetic flowmeter characteristics from magnetic field data", J.Phys D:Appl.Phys, vol.14, pp.373-388, 1981.
13. R. T. H. Alden, "Liquid analogs of electrical machines",McMaster University press, Canada
14. "액체금속로 냉각제 기술개발", 한국원자력연구소 보고서 '93
15. "액체금속로 냉각제 기술개발", 한국원자력연구소 보고서 '94
16. "액체금속로 냉각제 기술개발", 한국원자력연구소 보고서 '95