

역류하는 알카리금속의 아말감-수용액계에서 교반구동기구-전자석에 대한 연구

최성근, 강철

위대한 수령 김일성동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《...원자력부문의 과학자들이 원자력에 대한 연구사업을 더 적극적으로 하도록 하여야 합니다.》(《김일성전집》 제60권 352페이지)

Li(Hg)/Li(OH) 2상접촉에 기초한 역류동위원소분리공정에서 교반은 상경계면의 결면을 부단히 갱신하기 위한 중요한 조건의 하나이다.[1-4]

논문에서는 전자기적진동식교반체계에서 중요한 교반구동기구-전자석의 여러가지 특성들을 평가하였다.

1. 전자석의 구조와 크기

일반적으로 전자석은 전기에너지를 기계적인 진동에너지로 바꾸는 기구이다. 전자석은 전자석속쇠, 계철, 자화선륜, 공극과 진동철편으로 구성되어있다.

전자석의 크기는 수은에서의 진동판의 예비적인 실험결과에 기초하여 선정하였다.

전자석의 속쇠는 전기강판(전기강 2)인 규소강판으로 자름면이 40mm×40mm 또는 40mm×50mm 되게 하였으며 강판들사이에 절연을 보장하기 위하여 강판두께의 5%에 해당하는 두께로 라크칠을 하였다. 그리고 직경 0.35~0.40mm의 에나멜동선으로 권회수가 1 800~2 000 회 되게 감아서 전자석을 제작하였다. 이렇게 제작된 전자석의 출력은 30W정도이다.

2. 전자석의 흡인력계산

전자석의 흡인력은 막스웰방정식에 기초하여 해석적으로 계산할수도 있고 에너지평형관계에 기초하여 그래프적으로 구할수도 있다. 전자석의 자기적특성을 정밀하게 측정할 수 있는 실험조건이 구비되지 못한 조건에서 해석적으로 계산하는 방법으로 흡인력을 평가할수 있다.[1]

막스웰공식으로부터 흡인력은 다음의 식으로 계산된다.

$$F = \frac{dW}{d\delta} \quad (1)$$

여기서 F , W , δ 는 각각 흡인력, 공극내 자기마당에너지, 자기회로의 공극크기이다.

공극에서의 자기마당의 에너지는 다음과 같다.

$$W = \frac{1}{2} B_{\delta} H_{\delta} S \delta \quad (2)$$

여기서 B_{δ} , H_{δ} , S 는 각각 공극에서의 자속밀도, 공극내 자기마당의 세기, 자극자름면면적이다.

진동판이 전자석의 흡인력을 받아 미소구간 $d\delta$ 만큼 이동할 때 공극의 자기마당에 네르기변화량은

$$dW = \frac{1}{2} B_{\delta} H_{\delta} d\delta \quad (3)$$

이다. 이것을 식 (1)에 대입하면 전자석의 흡인력에 대한 식이 얻어진다.

$$F = -\frac{B^2}{2\mu_0} = -\frac{BH}{2} \quad (4)$$

여기서 $\mu_0 = 0.4\pi 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$ 는 진공의 투자률이다.

진공의 투자률값을 대입하고 흡인력의 단위를 kg으로 환산하면 흡인력은 다음과 같이 표시된다.

$$F = 4.06 \cdot 10^8 B_{\delta}^2 S$$

$$F = 4.06 \cdot 10^8 \frac{\phi_{\delta}^2}{S} \quad (5)$$

전자기적진동식교반체계의 자기회로는 그림 1과 같다.

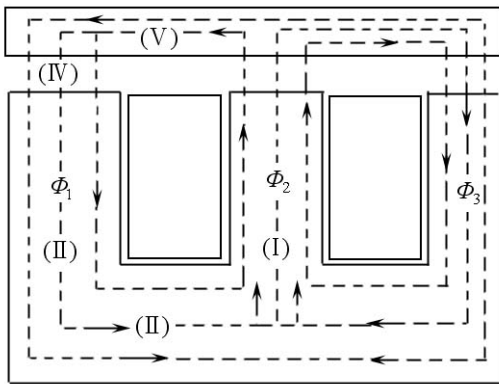


그림 1. 전자기적진동식교반체계의 자기회로

자기회로가 대칭으로 구성되어있으므로 절반구간에 해당하는 투자률을 구하면 된다. 절반인 자기회로의 구간은 5개 구간으로 되어있고 각 구간에서의 자름면면적과 길이는 전자석의 규격으로부터 계산할수 있다.

자기회로계산에서 기본은 매 구간에서의 μ 값을 구하는것이다. 그런데 이 값은 우리가 구하려는 기자력에 따라 변하는 량이므로 점차근사를 적용하여야 한다.

먼저 $\mu \gg \mu_0$ 관계를 리용하여 모든 $1/\mu$ 를 $1/\mu_0$ 으로 놓고 계산한다. 이렇게 계산된 자속은 기자력이 전부 자극에 걸려있다고 보는 리상적인 경우이므로 실지 자속은 이 값보다 좀 작다. 따라서 자속을 계산되어 나온것보다 조금 작게 놓고 다시 기자력과 비슷해질 때까지 μ 를 수정하면서 계산한다.

이렇게 계산하면 자속의 크기는 대략 $\phi_0 \approx 0.75 \cdot 10^{-3} \text{Wb}$ 이다. 이것을 식 (5)에 넣고 계산하면 흡인력은 대략 2~5g정도의 값이 얻어진다.

이 값을 식 $h = \frac{m}{s\rho}$ 에 넣고 계산하면 진동판의 진동범위가 대략 수mm범위에 놓인다는

것을 알수 있다. 여기서 h 는 진동판의 두께중 수은속에 잠기는 부분의 길이, m 은 진동판의 질량, s 는 수은과 접촉하는 진동판의 면적, ρ 는 수은의 밀도이다.

반응구역이 대략 μm 정도인 조건에서 진동면이 계면에 놓이는 구간은 3mm, 진동범위는 수백 μm 정도이므로 교반구간이 충분하다는것을 알수 있다.

3. 전자석의 공극과 흡인력사이의 관계

전자석의 자극과 진동판사이에는 전자석과 교환단사이의 일정한 공간 즉 교환단의 밀판두께, 수은아말감층 등으로 하여 전자석의 자기회로에서의 공극의 크기가 부단히 변하게 된다. 그러므로 이 변화가 진동의 세기에 주는 영향을 평가하여야 한다.

전자석의 공극크기와 흡인력사이에는 다음의 관계가 있다.

$$F = 5.1 \cdot (iw)^2 \frac{\mu_0 s}{\delta^2} \quad (6)$$

식 (6)에서 보는바와 같이 전자석의 흡인력은 공극크기의 2제곱에 거꾸비례한다.

선류의 기자력이 일정할 때 공극과 흡인력사이의 관계는 그림 2와 같다.

그림 2에서 보는바와 같이 공극이 작아짐에 따라 흡인력은 대단히 커진다.

$\delta=0$ 이면 흡인력은 이론상 무한대로 되어야 하지만 실제로는 자기도체에서의 포화때문에 자기저항이 대단히 커지므로 자속은 적게 증가하며 따라서 한계값을 가지게 된다.

공극이 클 때에는 계산곡선과 실험곡선은 일치한다. 그러나 공극이 작아지면 흡인력은 일정한 한계값을 가진다.

공극의 크기와 전자석의 흡인력사이에는 이런 관계가 있기때문에 수은두께가 증가하면 교반세기가 약해진다. 따라서 수은두께를 작게 하는것이 교반세기를 강화하는데서 중요한 요구로 된다. 이와 같이 일반적으로 공극크기를 작게 배치하면 유리하지만 실제적인 배치는 열평가까지 고려하여 결정하여야 한다.

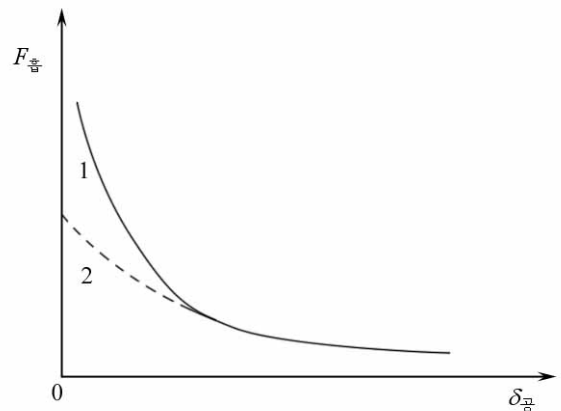


그림 2. 공극과 흡인력사이의 관계
1-실험곡선, 2-이론곡선

이런 관계가 있기때문에 수은두께가 증가하면 교반세기가 약해진다. 따라서 수은두께를 작게 하는것이 교반세기를 강화하는데서 중요한 요구로 된다. 이와 같이 일반적으로 공극크기를 작게 배치하면 유리하지만 실제적인 배치는 열평가까지 고려하여 결정하여야 한다.

4. 전자석에서 방출되는 열평가

전자석에서 방출되는 열은 에너지평형관계로부터 평가할수 있다. 전자석의 선류에 전압을 걸어주었을 때 전압평형방정식은 다음과 같다.

$$u = iR + \frac{d\phi}{dt} \quad (7)$$

식 (7)의 양변에 it 를 곱하면 다음과 같은 에네르기평형식이 얻어진다.

$$uit = i^2 Rt + i\phi \quad (8)$$

식 (8)을 적분하면 다음과 같다.

$$\int_0^t uidt = \int_0^t i^2 Rdt + \int_0^\phi id\phi \quad (9)$$

여기서 ϕ 는 순간자속이다.

식 (9)에서 왼변은 전원을 투입한 순간부터 t 시간까지 전자석에 공급된 전체 에네르기이고 오른변의 첫항이 전자석에서의 열손실을 표시한다.(식 (10)) 마지막항은 자기마당에 축적되는 에네르기로서 이것이 진동판에 전달되는 에네르기로 된다.

$$Q = \int_0^t i^2 Rdt \quad (10)$$

식 (10)에 들어있는 전자석에서 전류의 시간적변화과정은 매우 복잡하다. 그것은 전자석은 철심이 있는 유도선률으로서 비선형요소이며 자화과정의 비선형특성으로 하여 유도도 L 이 자속과 전류자체에 관계되기때문이다.

철심에서의 와류와 리력손실도 전류크기에 영향을 준다. 그러므로 전류의 시간적변화를 해석적으로 얻을수 없다. 그러므로 우리는 전자석회로의 전류를 실험적으로 결정하여 실험값을 식 (10)에 넣어 열손실을 평가하였다.

모든 실험에서 열손실은 10%를 넘지 않았다. 이때 평균전자석출력은 30W정도였다.

5. 교반중심의 모양

계산을 쉽게 하기 위하여 진동판의 중심을 자리표원점에 두었다.(그림 3) 진동판이 리리움아말감수에 떠있으므로 이것은 양끝이 자유단으로 되어있는 진동판의 진동으로 귀착된다.

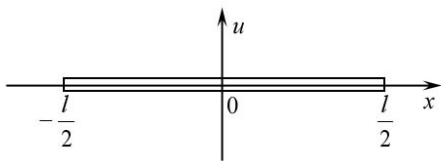


그림 3. 진동판의 모양

이때 방정식 $\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} + \frac{EJ}{\rho s} \cdot \frac{\partial^4 u(x, t)}{\partial x^4} = 0$ 을 다음

의 경계조건에서 풀어야 한다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{d^3 u}{dx^3} = 0 \quad (11)$$

일반풀이는 $u_0(x) = A \cos kx + B \sin kx + C \operatorname{sh} kx + D \operatorname{ch} kx$ 이다.

먼저 대칭진동인 경우의 풀이는 다음과 같다.

$$u_0(x) = A \cos kx + C \operatorname{ch} kx \quad (12)$$

경계조건을 적용하면

$$\frac{A}{C} = \frac{\operatorname{ch} k \frac{l}{2}}{\cos k \frac{l}{2}}, \quad \frac{A}{C} = -\frac{\operatorname{sh} k \frac{l}{2}}{\sin k \frac{l}{2}}. \quad (13)$$

이로부터 다음과 같은 식을 얻을수 있다.

$$\tan \frac{kl}{2} + \text{th} \frac{kl}{2} = 0 \quad (14)$$

이때의 진동모양은 그림 4와 같다.

다음으로 반대칭진동일 때 풀이는 다음과 같다.

$$u_0(x) = B \sin kx + D \text{sh} kx \quad (15)$$

경계조건을 적용하면

$$\frac{B}{D} = \frac{\text{sh} k \frac{l}{2}}{\sin k \frac{l}{2}}, \quad \frac{B}{D} = \frac{\text{ch} k \frac{l}{2}}{\cos k \frac{l}{2}}. \quad (16)$$

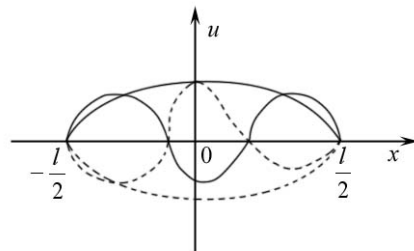


그림 4. 대칭진동모양

따라서 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\tan \frac{kl}{2} - \text{th} \frac{kl}{2} = 0 \quad (17)$$

이때의 진동모양은 그림 5와 같다.

그림 5에서 보는바와 같이 진동판의 진동형태는 상계면전반에서 조화진동이다. 전자석의 흡인력이 작용하면 진동은 강제진동이지만 진동의 형태는 달라지지 않는다.

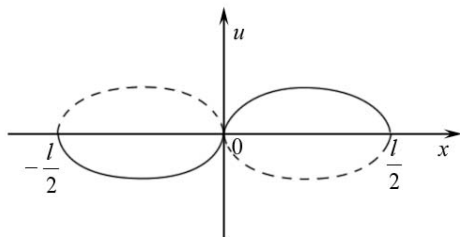


그림 5. 반대칭진동모양

맺 는 말

구동전자석의 자기회로와 흡인력을 계산한 결과 구동전자석의 흡인력은 공극의 크기에 따라 변하지만 공극을 6mm로 유지하는 경우 질량적으로 대략 5g정도이다.

또한 구동전자석에서의 열방출을 실험적으로 평가한 결과 구동전자석의 열방출은 출력의 10%정도이며 전자석의 출력은 약 30W이다. 방출되는 열은 공기랭각할수도 있고 수산화리튬염결정제거에 리용할수도 있다.

전자기적진동식교반에서 진동교반의 모양은 대칭진동인 경우와 반대칭진동인 경우 모두 교반체적을 조화진동형태로 교반한다.

참 고 문 헌

- [1] G. M. Began et al.; J. Inorg. Nucl. Chem., **375**, 1313, 1975.
- [2] A. A. Palko et al.; J. Chem. Phys., **64**, 4, 1828, 1976.
- [3] J. R. Black et al.; J. Am. Chem. Soc., **231**, 29, 2009.
- [4] Gu Zhi Guo et al.; Progress in Chemistry, **23**, 9, 2011.

주체103(2014)년 11월 5일 원고접수

**Investigation on the Stirring Drive Machine-Electromagnet
in the Amalgam-Aqueous Solution System
of the Alkali Metal with Countercurrent**

Choe Song Gun, Kang Chol

We determined the magnetic circuit sucking force and vibration shape of the stirring drive machine-electromagnet in the amalgam-aqueous solution system of the alkali metal with countercurrent.

Key words: countercurrent, amalgam-aqueous solution system, vibration shape